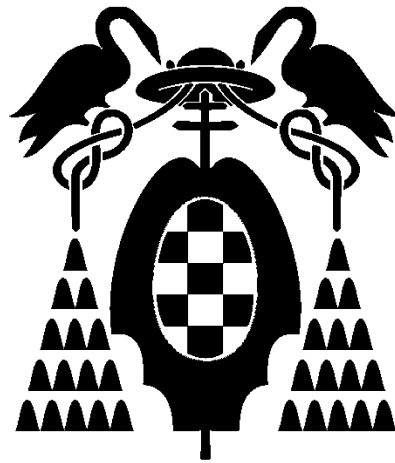


UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones



Trabajo Fin de Grado

**“Posicionamiento 2D5 en interiores mediante
comunicaciones inalámbricas RF”**

Samuel Fernández Arcones

2012

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

Trabajo Fin de Grado

**“Posicionamiento 2D5 en interiores mediante comunicaciones
inalámbricas RF”**

Autor: Samuel Fernández Arcones

Director: Juan Carlos García García

Tribunal:

Presidente: D. José Manuel Villadangos Carrizo.

Vocal 1º: D. Marta Marrón Romera.

Vocal 2º: D. Juan Carlos García García.

Calificación:

Fecha:

A mis padres, a mi hermana y a ella.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mi tutor Juan Carlos; por darme la oportunidad de trabajar con él, además de por todas las ideas y el apoyo, que me ha suministrado a lo largo de todo este tiempo. También quería dar las gracias a Jesús Ureña y demás componentes del equipo de Geintra *US/RF* por acogerme en su grupo y ayudarme siempre que lo he necesitado.

Por ultimo, mostrar mi agradecimiento a mis compañeros y amigos de Geintra *US/RF*, laboratorios O31, O22 y O21 por todas las ayudas prestadas y los buenos momentos.

Índice general

I	Resumen	1
II	Abstract	5
III	Memoria	9
1.	Introducción	11
1.1.	Planteamiento y Objetivos	11
1.2.	Estructura del documento	12
2.	Soluciones actuales para la localización en interiores	15
2.1.	Introducción	15
2.2.	Tecnologías para Localización en Interiores	16
2.2.1.	Infrarrojos	16
2.2.2.	Visión Artificial	17
2.2.3.	Ultrasonidos	18
2.2.4.	RadioFrecuencia	20
2.3.	Técnicas de Localización con RadioFrecuencia	21
2.3.1.	Reconocimiento de Patrones de radiación: fingerprinting	21
2.3.2.	Tiempo de Llegada	22
2.3.3.	Tiempo de Ida y Vuelta (RTT)	24
2.3.3.1.	Elección del par de tramas de control: Mecanismos RTS/CTS	24
2.3.4.	Ángulo de Llegada	26
2.3.5.	Nivel de Potencia Recibido	27
2.4.	Metodología genérica de localización en RF	27
2.5.	Tecnologías estándar en RF	29
2.5.1.	Bluetooth	29
2.5.2.	RFID	30
2.5.3.	UWB	31
2.5.4.	WiFi	31
2.5.5.	ZigBee	32
2.6.	Discusión Crítica	32
2.6.1.	Análisis de un sistema WiFi comercial: el RTLS de Ekahau	34
2.6.2.	Conclusiones	34
3.	Modelado y Simulación del Sistema de Localización RF en interiores	37
3.1.	Estructura física del Sistema de Localización RF	37
3.2.	Modelado del sistema RF	38
3.2.1.	Modelo del canal RF	39

3.2.1.1.	Escenarios de medida	39
3.2.1.2.	Caracterización del canal	40
3.2.2.	Atenuación por distancia, paredes y muros	43
3.2.3.	Influencia del cuerpo humano en el modelo de enlace ZigBee	45
3.3.	Simulación del sistema RF	46
3.3.1.	Visión general del sistema RF	46
3.3.2.	Modelado del entorno	50
3.3.2.1.	Desvanecimiento del nivel de potencia RSSI	51
3.3.2.2.	Atenuaciones de la señal RF	51
3.3.3.	Simulación de la posición del móvil	51
3.3.3.1.	Nivel de potencia real	51
4.	Red de Localización: Dispositivos Físicos	55
4.1.	Introducción	55
4.2.	Protocolo de comunicación inalámbrica - ZigBee	56
4.2.1.	Características significativas de IEEE 802.15.4/ZigBee	56
4.2.2.	Requisitos Hardware	57
4.2.3.	Topologías de red y dispositivos	58
4.2.4.	Comunicaciones	59
4.2.4.1.	Capa Física (PHY)	59
4.2.4.2.	Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)	60
4.2.4.3.	Capa de Red (NTW)	60
4.2.4.4.	Capa de Seguridad (SEC)	60
4.2.4.5.	Capa de Aplicación (PHY)	61
4.2.5.	Encaminamiento (routing)	61
4.2.6.	Perfiles	62
4.3.	Estructura del sistema localización	63
4.3.1.	Microcontroladores CC243x	63
4.3.1.1.	CC2430	63
4.3.1.2.	CC2431	65
4.3.2.	Plataforma de desarrollo: elementos hardware	65
4.3.2.1.	Módulos CC243x-EM	66
4.3.2.2.	SOC BB. BATTERY BOARD	67
4.3.2.3.	SMARTRF04EB	67
4.3.2.4.	Módulo auxiliar para las balizas del ILS	68
4.3.3.	Comunicación entre el PC y la red ZigBee	69
4.3.3.1.	Mensajes del coordinador al nodo móvil	71
4.3.3.2.	Mensajes del nodo móvil al coordinador	71
4.3.3.3.	Mensajes del coordinador a un nodo de referencia	72
4.3.3.4.	Mensajes de un nodo de referencia al coordinador	73
4.4.	Interfaz entre la red de localización y otros dispositivos	73
4.4.1.	Características del módulo BlueBoard LPC1768H	74
4.4.2.	Comunicación con el BlueBoard LPC1768H a través de la red ZigBee	75
5.	Estimación de la posición del móvil. Algoritmos de Localización	79
5.1.	Motor de Localización - Location Engine	79
5.1.1.	Operación del Motor de Localización	80
5.1.2.	Registros de Location Engine	82
5.1.3.	Coordenadas de referencia	82
5.1.4.	Niveles de potencia de señal emitidos	83

5.1.5.	Parámetros de caracterización del entorno	83
5.1.6.	Carga de parámetros	85
5.1.7.	Estimación de posición	86
5.2.	Multilateración con Ejes Radicales	86
5.2.1.	Estimación de la posición en 2D5	90
5.3.	Evaluación de Disparidad de Balizado	90
5.4.	Ajuste a Grafos de Descripción Métrica - MDG	94
6.	Pruebas Experimentales	101
6.1.	Introducción	101
6.2.	Resultados pruebas experimentales	104
6.2.1.	Prueba Experimental 1: ruta de complejidad media	104
6.2.2.	Prueba Experimental 2: espacios abiertos	110
6.2.3.	Prueba Experimental 3: prueba 2D5	116
6.2.4.	Prueba Experimental 4: simulador de red RF ZigBee	121
6.3.	Discusión Crítica	124
7.	Conclusiones y Trabajos Futuros	127
IV	Pliego de condiciones	131
V	Manual de Usuario	135
A.	Simulador de red RF ZigBee	137
A.1.	Cargar mapa	138
A.2.	Cargar rutas	138
A.3.	Selección de balizas	139
A.4.	Posición del móvil	139
A.5.	Potencia	140
A.6.	Estimación de la posición	141
A.7.	Paseo móvil	141
A.8.	Simulaciones extra	141
B.	Puesta en marcha de la red de localización	143
C.	Grabación del firmware en los módulos ZigBee	147
C.1.	Compilador IAR EmBedded Workbench	147
C.2.	Códigos fuente de los módulos CC243x	148
C.3.	Programación de los módulos CC243x	149
C.3.1.	Pasos a seguir para la programación de un módulo CC243x	149
C.3.2.	Carga del Firmware de un coordinador para el Sistema de Localización .	150
C.3.3.	Carga del Firmware de un nodo de referencia para el Sistema de Localización	152
C.3.4.	Carga del Firmware de un nodo móvil para el Sistema de Localización . .	152
VI	Bibliografía	153

Índice de figuras

2.1. Estado actual de desarrollo y grado de precisión de las diferentes tecnologías de localización en interiores. Imagen extraída de [HSK04]	16
2.2. Active Badget Tags. Imagen extraída de [WHFG92]	17
2.3. Sistema Active Bat. Imagen extraída de: http://www.cl.cam.ac.uk	19
2.4. Ejemplo de posicionamiento en un sistema TOA con tres nodos baliza	23
2.5. Ejemplo de posicionamiento en un sistema TDOA con tres nodos baliza	23
2.6. Intercambio de tramas RTS/CTS entre dos nodos inalámbricos. Descripción del RTT	25
2.7. Intercambio de tramas RTS/CTS	25
2.8. Ejemplo de posicionamiento en un sistema AOA con dos nodos baliza	26
2.9. Metodología	28
2.10. Predominio de tecnologías RF en los sistemas de localización en interiores	29
2.11. Interfaz de usuario del Sistema Ekahau	34
2.12. Fortaleza de la señal WiFi en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	35
2.13. Fase de calibración del Sistema Ekahau en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	35
3.1. Estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá	38
3.2. Entorno interior abierto, Hall	39
3.3. Entorno interior con pasillo, despachos y baños	40
3.4. Entorno interior, Laboratorio	40
3.5. Ejemplo de niveles de potencia en LOS para la orientación 'espacios abiertos' (izq) y 'espacios estrechos' (dcha)	43
3.6. Influencia del cuerpo humano en la potencia recibida	45
3.7. Influencia del cuerpo humano en la medida de distancias	46
3.8. Diagrama de bloques del simulador RF ZigBee	47
3.9. Interfaz de usuario del simulador RF ZigBee	48
3.10. Planta 3ª del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico, Universidad de Alcalá	49
3.11. Interfaz de usuario - Grafo de rutas y balizas	50
3.12. Selección de posición del móvil	50
3.13. Visión del simulador estimando la posición del móvil	53
4.1. Protocolos de comunicación inalámbrica. Imagen extraída de [TI11]	57
4.2. Topologías de red RF ZigBee. Imagen extraída de [TI11]	58
4.3. Arquitectura de la pila de comunicaciones ZigBee. Imagen extraída de [TI11]	59
4.4. Canales IEEE 802.14.4 (ZigBee)	60
4.5. Esquema del sistema de localización	63

4.6. Periféricos CC2430. Imagen extraída de [TI11]	64
4.7. Periféricos CC2431 incluyendo Location Engine. Imagen extraída de [TI11]	65
4.8. Contenido del kit CC2430 DK. Imagen extraída de [TI11]	66
4.9. Módulo CC243x EM. Imagen extraída de [TI11]	66
4.10. SocBB Battery Board	67
4.11. Puertos entrada/salida A y B del SocBB. Imagen extraída de [TI11]	67
4.12. Tarjeta SmartRF04EB. Imagen extraída de [TI11]	68
4.13. Placa diseñada para nodo de referencia	69
4.14. Caja con placa diseñada para nodo de referencia	69
4.15. Esquema de conexión entre nodo móvil (CC2431) y BlueBoard LPC1768H	74
4.16. Nodo móvil integrado con dispositivo BlueBoard LPC1768H	74
4.17. Diagrama de bloques LPC1768H	75
5.1. Entradas y Salidas del Motor de Localización	80
5.2. Diagrama de bloques del Motor de Localización - Location Engine	81
5.3. Variación del nivel de potencia RSSI con la distancia	84
5.4. Situación de los módulos ZigBee para la calibración del parámetro A	84
5.5. Resolución gráfica del sistema de ecuaciones compuesto por 4 circunferencias cuando las estimaciones de distancia, \hat{d}_i , son precisas	87
5.6. Propiedades del eje radical	88
5.7. Resolución gráfica del sistema de ecuaciones correspondientes a 4 circunferencias cuando las estimaciones de distancia \hat{d}_i tienen error	90
5.8. Algoritmo de localización <i>Multilateración con Ejes Radicales</i> con una baliza introduciendo un gran error. La estimación inicial (*) se vería muy desplazada al incluirse una medida muy dispar	91
5.9. Corte de 3 circunferencias correspondiente a 3 nodos de referencia o balizas	92
5.10. Desplazamiento virtual de las balizas para hacer coincidir todas las medidas en un solo punto	93
5.11. Paseo de prueba por la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	94
5.12. Ejemplo de posiciones del móvil poco probables o imposibles en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	95
5.13. Ejemplo de posiciones del móvil posibles en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	95
5.14. Movimientos del móvil en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	96
5.15. Grafo de Descripción Métrica, MDG, en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	96
5.16. Grafo de Descripción Métrica generado automáticamente a partir de mapas en formato XML, 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico	97
5.17. Grafo de Descripción Métrica generado automáticamente a partir de mapas en formato XML, 3ª planta completa del Edificio Politécnico	97
5.18. Diagrama de flujo del MDG	98
5.19. Esquema gráfico de funcionamiento del MDG sin modelo de movimiento	98
5.20. Esquema gráfico de funcionamiento del MDG con modelo de movimiento	99
5.21. Ejemplo práctico de la función MDG desarrollada en Matlab	100
6.1. Esquema de la estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá	101

6.2. Plano de la estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Elec- trónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá	102
6.3. Diagrama de bloques de las pruebas realizadas	102
6.4. Recorrido prueba experimental 1	104
6.5. Resultados prueba experimental 1	104
6.6. Resultados prueba experimental 1, LE vs LE+MDG	105
6.7. Errores entre LE y LE+MDG	105
6.8. Error de habitación utilizando LE y LE+MDG	106
6.9. Resultados prueba experimental 1, Multilateración con Ejes Radicales con Eva- luación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG	106
6.10. Errores entre ER-DB y ER-DB+MDG	107
6.11. Error de habitación utilizando ER-DB y ER-DB+MDG	107
6.12. Resultados prueba experimental 1, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG	108
6.13. Errores entre LE y ER-DB+MDG	108
6.14. Error de habitación utilizando LE y ER-DB+MDG	109
6.15. Recorrido prueba experimental 2	110
6.16. Resultados prueba experimental 2	110
6.17. Resultados prueba experimental 2, LE vs LE+MDG	111
6.18. Errores entre LE y LE+MDG	111
6.19. Error de habitación utilizando LE y LE+MDG	112
6.20. Resultados prueba experimental 2, Multilateración con Ejes Radicales con Eva- luación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG	112
6.21. Errores entre ER-DB y ER-DB+MDG	113
6.22. Error de habitación utilizando ER-DB y ER-DB+MDG	113
6.23. Resultados prueba experimental 2, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG	114
6.24. Errores entre LE y ER-DB+MDG	114
6.25. Error de habitación utilizando LE y ER-DB+MDG	115
6.26. Determinación de la posición del móvil con el error más elevado	115
6.27. Estructura RF propuesta en la 2ª planta del Departamento de Electrónica, Edi- ficio Politécnico de la Universidad de Alcalá	116
6.28. Recorrido prueba experimental 3	117
6.29. Resultados prueba experimental 3, 3ª planta	117
6.30. Resultados prueba experimental 3, 2ª planta	118
6.31. Resultados prueba experimental 3, LE vs LE+MDG 3ª planta	118
6.32. Resultados prueba experimental 3, LE vs LE+MDG 2ª planta	118
6.33. Resultados prueba experimental 3, 3ª planta, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG	119
6.34. Resultados prueba experimental 3, 2ª planta, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG	119
6.35. Resultados prueba experimental 3, 3ª planta, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG . .	120
6.36. Resultados prueba experimental 3, 2ª planta, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG . .	120
6.37. Recorrido prueba experimental 4	121
6.38. Diagrama de bloques de la prueba experimental 4	121
6.39. Imagen del simulador RF ZigBee con una densidad de balizas baja	122
6.40. Errores entre LE y ER-DB con una densidad de balizas baja	122
6.41. Imagen del simulador RF ZigBee con una densidad de balizas alta	123

6.42. Errores entre LE y ER-DB con una densidad de balizas alta	123
A.1. Interfaz de usuario del simulador de red RF ZigBee	137
A.2. Interfaz de usuario - con mapa, grafo de rutas y balizas seleccionadas	139
A.3. Selección de las balizas activas	140
A.4. Selección de la posición del móvil en la interfaz	140
A.5. Potencia recibida de cada una de las balizas en el móvil	140
A.6. Paseo virtual del móvil en el entorno	141
A.7. Simulación de propagación RF en interiores y simulacion de actuación del MDG	141
B.1. Coordinador de la red de localización	143
B.2. Conexión de las balizas de referencia de la red de localización	144
B.3. Introducción de mensajes por el Hyperterminal	145
B.4. Impresión de información por el Hyperterminal	145
C.1. Compilador IAR Embedded Workbench	147
C.2. Selección del tipo de dispositivo en el entorno IAR Embedded Workbench	149
C.3. Programación de un módulo CC243x sobre SocBB	150
C.4. Inicio de programación	150
C.5. Finalización de programación	151
C.6. Indicaciones del pre-procesador según el Hardware utilizado	151
C.7. Elección de nodo de referencia o nodo móvil en la programación	152

Índice de tablas

3.1. Potencia media (dBm) y el parámetro K de la estadística de Rice de los desvanecimientos en los distintos escenarios interiores	42
4.1. Formato de mensajes del puerto serie	70
4.2. Activar sondeo de posición de un nodo móvil	71
4.3. Detener sondeo de posición de un nodo móvil	71
4.4. Cargar parámetros A y n del nodo móvil	71
4.5. Solicitud de parámetros A y n del nodo móvil	71
4.6. Respuesta al sondeo de posición del nodo móvil	71
4.7. Devolución de parámetros A y n tras una carga de estos	72
4.8. Devolución de parámetros A y n tras una solicitud de estos	72
4.9. Conexión a la red de un nodo móvil	72
4.10. Solicitud de coordenadas a un nodo de referencia (en metros)	72
4.11. Carga de coordenadas a un nodo de referencia (en metros)	72
4.12. Devolución de coordenadas de un nodo de referencia (en metros)	73
4.13. Confirmación de coordenadas cargadas	73
4.14. Conexión a la red de un nodo de referencia	73
4.15. Información de Location Engine y de las balizas de referencia	76
4.16. Información de Location Engine y de las balizas de referencia comprimida	76
5.1. Parámetro n	85
5.2. Medidas para el cálculo del parámetro A	85
5.3. Combinación de balizas para formar tripletas	92
5.4. Tripletas con mayor error en la estimación de posición	94
6.1. Información de Error medio en la prueba experimental 1	104
6.2. Información de Error medio en la prueba experimental 2	110
6.3. Información de Error medio en la prueba experimental 3	116
6.4. Información de Error medio en la prueba experimental 4 (densidad de balizas baja)	121
6.5. Información de Error medio en la prueba experimental 4 (densidad de balizas alta)	122
6.6. Comparativa del error medio en las pruebas experimentales	124

Parte I

Resumen

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se presenta una forma de mejorar las estimaciones de posición en sistemas de localización en interiores (Indoor Location Systems, ILS) basados en lecturas de los niveles de potencia RSSI (Received Signal Strength Indication) de una red RF ZigBee. Para establecer la estimación de la posición del móvil se usan *Location Engine* del chip TI-CC2431 y *Multilateración con Ejes radicales* al cual se añade una *Evaluación de Disparidad de Balizado*. Las estimaciones se mejoran mediante un filtrado posterior con un *Ajuste a Grafos de Descripción Métrica* (Metric Description Graph, MDG). El sistema se ha comprobado experimentalmente en tareas de localización de personas en entornos interiores extensos.

Palabras clave

Sistema de localización en interiores, nivel de potencia RSSI, algoritmos de localización, grafo de descripción métrica (MDG), ZigBee.

Parte II

Abstract

Abstract

This Degree's Thesis presents a way to improve the position estimation of indoor location systems (ILS) based on the Received Signal Strength Indication (RSSI) of an RF network ZigBee. Two different estimation techniques have been studied: *Location Engine* from TI-CC2431 devices and *Multilateration with radical axis*. Further improvements of the estimation were made using two other techniques: *Metric Description Graph* and *Beacons Shift Estimation*. In order to validate the proposal, some experimental test for people location has been carried out in indoor extended environments.

Keywords

Indoor location Systems (ILS), Received Signal Strength Indication (RSSI), location algorithms, Metric Description Graph (MDG), ZigBee.

Parte III

Memoria

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de localización en interiores, encargados de localizar y posicionar un móvil en un entorno interior determinado, han experimentado en los últimos años un enorme desarrollo motivado por las necesidades de una sociedad cada vez más tecnológica. Dentro de este tipo de sistemas, un grupo que goza de gran aceptación es el de los sistemas de radio frecuencia debido fundamentalmente a su comunicación inalámbrica, al bajo coste y a la sencillez de operación de este tipo de sensores.

Hasta el momento, los esfuerzos de desarrollo en los sistemas de comunicación inalámbrica se habían centrado en aspectos como la estandarización, el uso del espectro radioeléctrico, la accesibilidad al medio y el coste. En resumen, se habían enfocado en hacer universalmente disponible el acceso a los sistemas de comunicación inalámbrica. Ahora que el acceso inalámbrico a los sistemas de información esta ampliamente extendido, los trabajos se centran en proporcionar nuevos servicios, demandados por los usuarios, o a plantear nuevas aplicaciones para las nuevas necesidades. Ya no es importante aumentar la tasa de transferencia de datos sino que se requerirán conceptos, propiedades y servicios completamente nuevos para hacer a los sistemas de comunicación inalámbrica más atractivos, flexibles y fáciles de usar. En este contexto, los sistemas de localización inalámbrica desempeñan un papel importante. Gracias a las técnicas de localización inalámbrica, un usuario puede obtener información sobre su posición o ser localizado desde cualquier otro punto.

En este Trabajo Fin de Grado se plantea el desarrollo de sistema inalámbrico RF ZigBee, que apoyado en diversas técnicas de localización y el estudio del entorno, pueda servir como punto de partida para la localización de personas o móviles en entornos extensos de interior. Un interior extenso es un espacio de grandes dimensiones, con varias plantas, pasillos, salas, habitaciones, etc. En el cual, interesa tener una localización aproximada, pero fiable.

1.1. Planteamiento y Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el estudio y realización de un sistema inalámbrico RF ZigBee que permita determinar la posición de una persona o móvil.

Se empleará para ello un sistema de sensores formado por balizas o nodos de referencia y un nodo móvil, que actuando como emisores/receptores de información permitan localizar o

posicionar dicho móvil en el entorno. El desarrollo de este trabajo se ha estructurado en cuatro partes bien definidas pero estrechamente relacionadas entre sí:

- Estudio de un modelo teórico que simule la transmisión, propagación y recepción de radio frecuencia en entornos interiores.
- Definición de la red de localización utilizada y los dispositivos físicos que la forman.
- Diseño de algoritmos de localización para estimar la posición de una persona o móvil en entornos interiores extensos.
- Comprobación experimental de las prestaciones del sistema a partir de medidas sobre un sistema de localización real en un entorno interior extenso como es la tercera planta del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico, Universidad de Alcalá.

Para el estudio del modelo teórico se simulará, mediante la herramienta de propagación Matlab, el comportamiento de las ondas de radio frecuencia en interiores, con el fin de obtener información de su comportamiento. Con esta información se podrá diseñar un simulador que permita conocer el comportamiento real de una red RF ZigBee en interiores y así, estimar de antemano los resultados que se obtendrán al realizar el montaje de dicha red en cualquier entorno interior real.

Una vez diseñado el simulador, conociendo las características que debe tener la red RF ZigBee a crear, se realizará un estudio de los dispositivos físicos a utilizar y que serán el centro de la red de localización. Una vez definidos los dispositivos se diseñarán los algoritmos de localización, que basados en los niveles de potencia RSSI (Received Signal Strength Indication) permitirán estimar la posición de la persona o móvil a localizar.

Finalmente, se llevarán a cabo un conjunto de pruebas prácticas en el entorno interior mencionado, para verificar el correcto funcionamiento del sistema propuesto. El objetivo final será comprobar si las estimaciones de posición del móvil son correctas y no inducen error de la posición real de la persona o móvil.

1.2. Estructura del documento

Este Trabajo Fin de Grado, se ha estructurado en siete capítulos atendiendo a los diferentes temas que han sido abordados en el desarrollo del mismo. Después de esta introducción, en el capítulo 2, se presenta una breve revisión de los trabajos más relevantes relacionados con el desarrollo de sistemas inalámbricos para la localización y posicionamiento de personas o móviles en interiores. Se realiza un análisis de la metodología utilizada para la localización de la persona o móvil, y una discusión crítica entre las dos técnicas más utilizadas, WiFi y ZigBee, y las razones de la elección final para la creación del sistema de localización en entornos interiores extensos.

En el capítulo 3, se plantea el diseño de un modelo teórico para radio frecuencia en interiores. Además, se crea un simulador con la herramienta Matlab que permita verificar dicho modelo en función del entorno, atenuaciones por distancia, paredes y/o muros, el número de balizas o nodos de referencia y la posición del móvil.

En el capítulo 4, se analizan los dispositivos físicos utilizados para la creación de la red RF ZigBee real. En concreto, los módulos de radiofrecuencia CC2430 y CC2431 del fabricante Texas Instruments con protocolo de comunicación ZigBee.

En el capítulo 5, se proponen una serie de algoritmos de localización para la estimación de la posición del móvil. Inicialmente se parte del algoritmo propio del fabricante de los dispositivos físicos, Motor de Localización o Location Engine, Location Engine no es un algoritmo en sí, sino un módulo IP (Intellectual Property) que ejecuta tal algoritmo en hardware. También se analizan las mejoras propuestas a dicho algoritmo. Por último, se analizan los algoritmos de localización propios propuestos.

En el capítulo 6, se propone el montaje práctico de la red diseñada en un entorno interior extenso. Se realizan pruebas prácticas con el fin de determinar y evaluar las prestaciones del sistema propuesto en función de diversos parámetros de calidad, tanto cuantitativa como cualitativa.

Por último, en el capítulo 7, se exponen las conclusiones finales, se resumen las principales aportaciones realizadas y se indican las futuras líneas de actuación que podrían derivarse del trabajo realizado.

Capítulo 2

Soluciones actuales para la localización en interiores

2.1. Introducción

Los problemas de la localización inalámbrica en entornos interiores ha sido objeto de un intenso estudio y análisis durante los últimos años. Hasta la fecha, ninguna de las soluciones propuestas ha conseguido el éxito que han alcanzado los sistemas de localización empleados en espacios abiertos, como el conocido GPS. Esto se ha producido por razones técnicas como el multitrayecto o la falta de visión directa entre los nodos que forman la red inalámbrica, muy superiores a los de la localización en espacios abiertos.

En esencia, el proceso de localización es conceptualmente independiente de que el nodo a localizar esté en el interior de un edificio o en un espacio abierto. Las técnicas que se emplean son diversas y principalmente dependen de la precisión con la que se deba encontrar el nodo a localizar. Así por ejemplo, los sistemas de satélites y las redes celulares son idóneos para localización para espacios abiertos. Por el contrario las redes inalámbricas de área local o WLAN (Wireless Local Area Network) están enfocadas a la oferta de servicios de localización inalámbrica en entornos de interior. De todos modos, tanto unas como otras son capaces de estimar la posición del nodo a localizar si la infraestructura y el método de localización son los adecuados, aunque la precisión variará dependiendo del entorno, de la tecnología y de los algoritmos empleados.

En este capítulo se realizará un revisión sobre las tecnologías hasta ahora utilizadas para el diseño, desarrollo y creación de sistemas de localización inalámbrica en entornos de interior. Estas técnicas incluyen IR (infrarrojos), VA (visión artificial), US (ultrasonidos) y RF (radiofrecuencia). Debido a que RF es la tecnología dominante en el mercado de los sistemas de localización y posicionamiento en interiores, por su disponibilidad, alcance y bajo coste, se presentarán los métodos y tecnologías inalámbricas de localización más comunes utilizados con RF. Estos métodos parten de la información extraída de diversos parámetros mensurables de la red como son el nivel de potencia recibido (RSS, Received Signal Strength), el tiempo de llegada de la señal (TOA, Time of Arrival) y el ángulo de llegada (AOA, Angle of Arrival), por el otro lado las tecnologías inalámbricas RF más extendidas incluyen Bluetooth, RFID, ZigBee, UWB y Wifi. Por último, dada la variedad de sistemas de localización inalámbrica RF existentes actualmente, se presentará la metodología concreta que se implementará en este Trabajo Fin de Grado para estimar y mejorar la posición del nodo móvil a localizar.

2.2. Tecnologías para Localización en Interiores

Entre las tecnologías más utilizadas en los sistemas de localización inalámbrica en entornos de interior se encuentran las tecnologías IR, VA, US y RF. Todas ellas pueden ser utilizadas como tecnologías de posicionamiento en interiores, pero cada una de ellas tiene su ámbito y aplicación y será decisión del usuario, utilizar una u otra, en función de parámetros tales como precisión, coste, mantenimiento, etc.

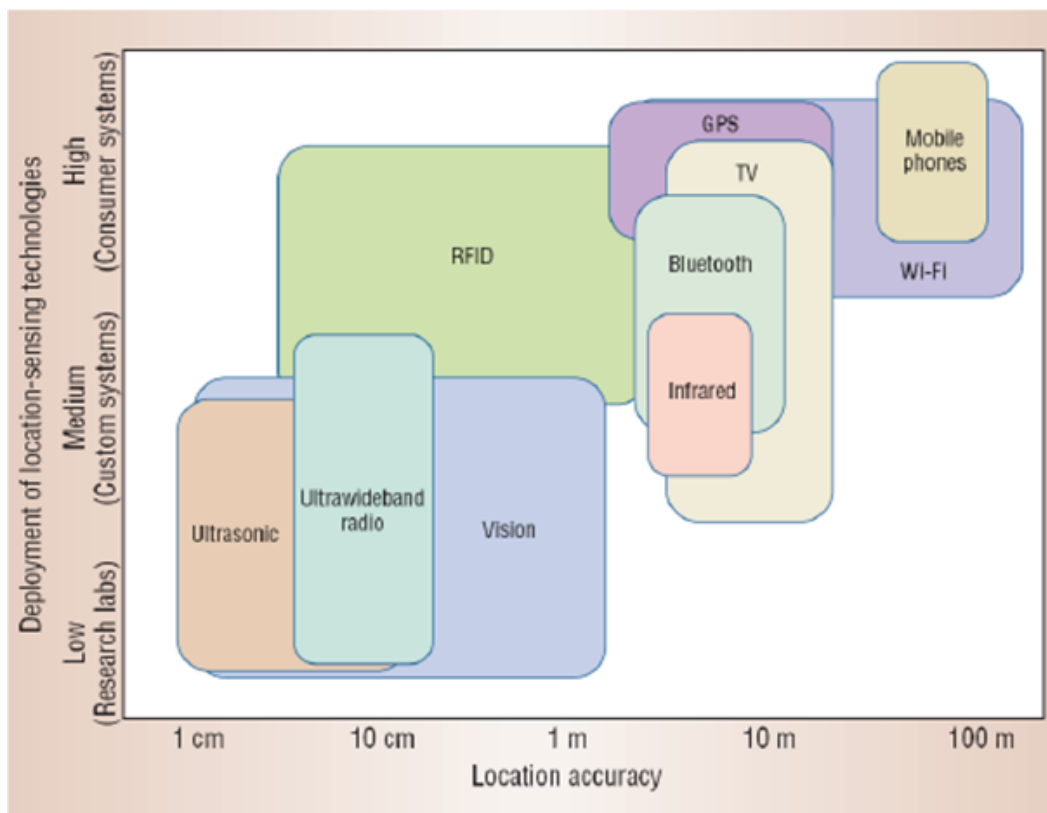


Figura 2.1: Estado actual de desarrollo y grado de precisión de las diferentes tecnologías de localización en interiores. Imagen extraída de [HSK04]

2.2.1. Infrarrojos

La radiación infrarroja o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible (400 - 700 nm), pero menor que la de las microondas (1 nm - 100 μm). Abarcando más de tres ordenes de magnitud, la radiación IR se encuentra aproximadamente entre los 700 nm y 300 μm.

Entre sus numerosas aplicaciones, como visión nocturna, termografía, meteorología, climatología, espectroscópica, etc., la tecnología IR aunque dado que el alcance típico de esta tecnología es de 5 – 10m máximo, normalmente, más que como tecnología de localización, se utilizan como tecnología de proximidad. Además, puesto que la longitud de onda de las señales que maneja la tecnología IR es muy pequeña en comparación con el tamaño de los obstáculos que se pueden encontrar en el interior de un edificio, las señales IR se reflejan en los mismos sin llegar a pasar

a través de ellos, dificultando la utilización de estas señales entre dos o más habitaciones. Por otra parte, la tecnología IR es muy sencilla de usar, barata, compacta y de bajo consumo, características atractivas en el desarrollo de sistemas de localización inalámbrica en interiores.

Por las características de las señales IR, las principales limitaciones de los sistemas de localización inalámbrica con IR son la presencia de luz fluorescente y luz solar, las cuales generan emisiones que interfieren con la señal IR. Por lo tanto, el ancho de banda efectivo de la señal IR está limitado por las interferencias con la luz del ambiente y por otras fuentes de emisión IR. Un ejemplo de sistema basado en Infrarrojos es Active Badge, que fue uno de los primeros sistemas desarrollados y una contribución importante para los sistemas de localización en interiores.



Figura 2.2: Active Badget Tags. Imagen extraída de [WHFG92]

En resumen, la tecnología IR, como tecnología base en un sistema de localización inalámbrica, tiene su mercado en los sistemas de proximidad, estando limitado su uso a aplicaciones que se desarrollen en áreas de interior restringidas donde se pueda garantizar una línea de visión directa entre los nodos IR. Estas limitaciones hacen que se descarten las señales IR como tecnología para desarrollar un sistema de localización inalámbrica en un entorno de interior extenso, como puede ser toda una planta de un edificio.

2.2.2. Visión Artificial

La VA, o visión por ordenador, es un subcampo de la inteligencia artificial. El propósito de la visión artificial es programar un ordenador para que entienda una escena o las características de una imagen, tratando de emular con una cámara la visión de un ojo humano. Uno de los campos de aplicación de la visión artificial es la localización y guiado de personas o robots en entornos de interior [SK02], utilizando las imágenes como métrica de localización en el diseño de estos sistemas.

Un ejemplo destacado de las aplicaciones desarrolladas en los entornos de interior con VA son aquellas encaminadas a aumentar la autonomía de las personas con diversidad funcional detectando situaciones de alto riesgo para ellas, habilitando técnicas de guiado automático o, por ejemplo, proveyendo de orientación y seguimiento a las personas ciegas en el interior de los edificios. Esta última aplicación, es uno de los mayores retos en el campo de la VA como sistema de localización y guiado en un entorno de interior. Cuando se pregunta a una persona ciega por los mayores problemas que tiene relacionados con el posicionamiento, responde que estos

son, determinar la posición de si mismos, la dirección en la que están orientados, y la falta de información sobre los objetos cercanos y su distancia a los mismos. Además, las personas ciegas necesitan conocer los peligros potenciales en cada instante, como las personas y mobiliario circundante, cambios de nivel o la altura del entorno entre otros. En este contexto, cualquier información sobre las características del entorno es importante [HDE04].

Ya desde finales de los setenta, cuando aparecieron los primeros sistemas de localización con VA [GSC79], estaba claro que, de forma implícita o explícita, estos sistemas debían incorporar información sobre el entorno en el que se iban a instalar. En particular, en los entornos de interior estos sistemas de localización necesitan de información sobre la geometría y métricas del entorno mediante mapas de ocupación, mapas topológicos o incluso secuencias de imágenes. En el caso de utilizar secuencias de imágenes, las imágenes tomadas durante el proceso de localización se comparan con las imágenes tomadas en una etapa previa de calibración del entorno con el fin de encontrar similitudes y así estimar la posición en la que se encuentra el nodo a localizar. Por lo tanto, la idea central de un sistema de localización con VA es obtener información métrica, directa o indirectamente, a partir de una serie de marcas (naturales o artificiales) que se detectan durante el proceso de localización y guiado. La tarea del sistema de visión es buscar e identificar esas marcas en el entorno, y a partir de la información contenida en un mapa del entorno, estimar la posición del nodo a localizar comparando la marca observada con la información almacenada.

Los necesarios procesos de calibración del entorno hace que los sistemas de localización con VA sean poco robustos y poco fiables ante cambios del entorno. Ésta es una importante desventaja frente a los sistemas de localización RF que, aunque la precisión en la estimación del nodo a localizar de estos últimos sea peor, pueden adaptarse de forma dinámica a los cambios en el entorno. Se deja a un lado a los sistemas de localización por RF basados en técnicas de reconocimiento de patrones o mapas de cobertura, que se explicarán en la sección 2.3.1. En consecuencia, las tecnologías, VA y RF, como sistemas de localización en entornos de interior, abarcan mercados muy diferentes en función de las necesidades del usuario y sus aplicaciones.

2.2.3. Ultrasonidos

Los sistemas de localización basados en US o sónar (Sound Navegation and Ranging), están siendo cada vez más comunes entre los sistemas de localización en entornos interiores. La baja velocidad de propagación de las señales (340 m/s) permiten realizar medidas precisas de los parámetros temporales de la señal US utilizando relojes de baja frecuencia. Se caracterizan por alcanzar precisiones de centímetros en la localización de un nodo móvil. Normalmente utilizan el tiempo de vuelo de las señales US como métrica de localización en el diseño de sistemas de localización en entornos de interior. Esta métrica permite obtener precisiones en la estimación de la posición del nodo a localizar de entre 0.1 y 50 cm , dependiendo del sistema específico [Dij04]. Debido a que las señales US no se propagan a través de las paredes u otros obstáculos, la infraestructura del sistema de localización inalámbrica por US deber ser instalada en cada habitación en la que se pretenda localizar. Además, los factores ambientales provocan cambios sustanciales en la propagación US, particularmente en su velocidad de propagación. La humedad del ambiente puede llegar a reducir hasta en un 0.3% la velocidad de propagación. Más drástico es el efecto del cambio en la temperatura, un cambio de 0 a 30° supone un cambio en la velocidad de propagación de las señales US de un 3% . Estas son unas desventajas claras frente a los sistemas de localización por RF, que podrían cubrir varias habitaciones o plantas enteras de un edificio con pocos nodos baliza y cuyas propiedades de propagación no se ven tan afectadas de cambios

por factores ambientales.

Uno de los primeros sistemas basados en US es el denominado sistema Active Bat [WJH97]. Está construido sobre un modelo de sistema centralizado de rastreo de localización que obtiene los datos de las balizas móviles, figura 2.3.

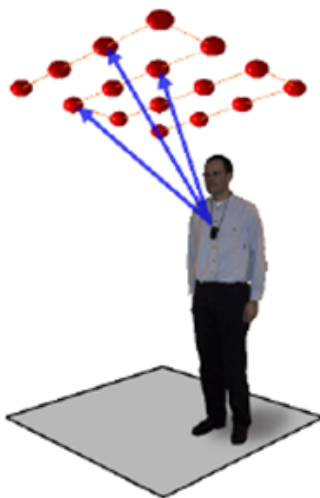


Figura 2.3: Sistema Active Bat. Imagen extraída de: <http://www.cl.cam.ac.uk>

La tendencia actual en el desarrollo de sistemas de localización US avanzados es imitar los sistemas biológicos encontrados en murciélagos o delfines, sistemas que reciben el nombre de ecolocalización o biosonar [Jon05]. Algunas especies de murciélagos son capaces de navegar y cazar gracias a la ecolocalización en condiciones de total oscuridad [SFO79]. Incluso algunas de estas especies pueden utilizar rangos específicos de frecuencias para adaptarse a las condiciones del entorno. En el caso de los delfines y otros cetáceos, la ecolocalización se ve favorecida por las características acústicas de su hábitat acuático, y les confiere una capacidad sensorial mayor en lugares donde la visión se ve limitada debido a la absorción y la turbidez del agua. Los sistemas de localización US biomiméticos imitan tanto la fisiología sensorial de estos animales como el procesamiento de señal que éstos realizan [KH01, PAC93, Kuc07]. De esta forma es posible extraer de los ecos ultrasónicos el tiempo de vuelo y las características del objeto que ha provocado la reflexión. Un enfoque posible es emitir pulsos modulados en frecuencia similares a los emitidos por estas especies para posteriormente analizar el eco recibido en el dominio de la frecuencia [KH01, PAC93]. O también es posible enviar impulsos cuyos ecos son procesados para obtener una secuencia de impulsos de duración proporcional a la amplitud, imitando así los potenciales de acción que transmiten información entre las células del sistema nervioso [Kuc07].

Varios son los sistemas de localización por US de alta precisión desplegados en un entorno de interior que se pueden encontrar en la literatura científica. Por ejemplo, el sistema de localización Bat que se basa en un dispositivo AT&T generador de señales US [ACH+01], el sistema *Constellation* [FHP98] o el sistema *Cricket* [PMB+01] entre otros. Pero, pese a la precisión centimétrica que consiguen estos sistemas en la estimación de la posición del nodo a localizar, el despliegue necesario de toda la infraestructura de red en la habitación, unido al esfuerzo requerido en su instalación, son grandes desventajas de estos sistemas. Actualmente, todos los sistemas de localización por US requieren de varios nodos US en la misma habitación, intentando garanti-

zar siempre una línea de visión directa entre los nodos involucrados en el proceso de localización. Normalmente, se necesitan más de tres nodos US en línea de visión directa (Line Of Sight, LOS) para poder garantizar un mínimo de precisión y reducir la susceptibilidad en el error cometido en las medidas. El esfuerzo requerido en la instalación de toda la infraestructura de red US, motivado por la necesidad de garantizar siempre una línea de visión directa entre los nodos US, hacen de los sistemas de localización basados en US ser impracticables en entornos de interior extensos. Además, contradicen los requerimientos de los usuarios, facilidad de despliegue, bajo coste y mínima infraestructura.

2.2.4. RadioFrecuencia

Las señales de RF son un subconjunto de la radiación electromagnética que se encuentra a 300 Hz y 3000 GHz . Este rango del espectro electromagnético se corresponde con las frecuencias de las señales eléctricas de corriente alterna usadas para producir y detectar ondas de radio. El recurso natural explotado es el espectro radioeléctrico. Su regulación, que corresponde a los gobiernos, es decisiva a la hora de potenciar la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías o impulsar mejoras en las ya existentes. La denominación de señales RF se pueden referir tanto a oscilaciones electromagnéticas en el interior de los circuitos como a la radiación por el espacio libre, siendo estas últimas a las que nos referiremos en este trabajo fin de grado.

Multitud de técnicas han sido desarrolladas para el posicionamiento inalámbrico en entornos de interior basadas en señales RF [GG05]. Aunque resulta especialmente complicado modelar la variación de las métricas de localización en un entorno de interior, ya sea mediante TOA, RSS o AOA, existen numerosas técnicas, modelos y sistemas encaminados a estimar la posición de un nodo móvil inalámbrico a partir únicamente de las métricas de localización RF observadas [GG05]. Hasta la fecha, la métrica que más atención ha recibido en el desarrollo de un sistema de localización inalámbrica es el RSS, pues resulta ser el parámetro de la señal transmitida más sencillo de obtener con cualquier dispositivo inalámbrico convencional, ya que este parámetro es necesario para ajustar la ganancia de la etapa receptora del nodo inalámbrico y para seleccionar el nodo vecino con el que poder comunicarse. Por su parte las métricas de localización TOA y AOA suelen llevar asociadas modificaciones en el hardware existente (antenas, medidas de tiempos de propagación, etc.) requiriendo de mayores inversiones en su desarrollo.

Uno de los métodos más explotados en la literatura científica sobre sistemas de localización, necesitan de una fase previa de calibración del entorno, de la que se puede extraer un modelo estadístico de propagación [RMT+02], y del que a su vez, se pueden derivar métodos de localización basados en comparación de patrones de radiación (huellas o fingerprinting) o bayesianos [GG05]. Sin embargo, estas técnicas son dependientes del entorno y un cambio en el mismo invalidaría la eficacia y precisión del método de localización.

Las señales RF presentan varias ventajas respecto a IR, VA y US. Estas señales RF pueden cambiar su dirección de propagación por reflexión o por difracción en los obstáculos, o atravesarlos, ampliando su rango de cobertura. Además, aunque la precisión conseguida por los sistemas de localización inalámbrica basados en RF se vea afectada por la falta de visión directa entre los nodos RF, existen multitud de técnicas capaces de reducir este efecto, garantizando una localización precisa en el nodo móvil. Por lo tanto, los obstáculos no suponen una barrera en el despliegue de un sistema de localización basado en señales RF, pudiendo cubrir con un número

reducido de nodos RF de referencia toda una planta de un edificio. En consecuencia, el coste de implantación es mucho menor. O mejor aún, siempre se podrá utilizar cualquier infraestructura inalámbrica o redes de sensores creada en los actuales edificios inteligentes como sería el caso de redes de sensores de temperatura, medidores de humos, etc..

2.3. Técnicas de Localización con RadioFrecuencia

En esta sección se expondrán las técnicas de localización inalámbrica más extendidos actualmente, utilizando como criterio de clasificación la métrica de localización o parámetro a medir respecto a la señal recibida. Estas mediciones son tomadas muestreando la señal recibida en el instante de tiempo de llegada, y están siempre relacionadas con la posición del nodo o nodos baliza del que provienen. Así, se pueden tener medidas direccionales entre el nodo a localizar y los nodos baliza, como el ángulo de llegada (AOA), o relacionados con distancias relativas, como el tiempo de llegada (TOA) o el nivel de potencia recibido (RSS) [GG05].

Es importante reseñar que uno de los factores que más limita la eficacia de los sistemas de localización inalámbrica es la precisión de las métricas de localización que se utilizan para estimar la posición. Normalmente, estas métricas de localización están condicionadas por el estándar de comunicación correspondiente. Es por esto que se analizarán las limitaciones de cada uno de los métodos de localización, provocadas a su vez por las limitaciones de las métricas de localización, como pueden ser la sincronización entre los nodos o el efecto del multitrayecto [Qi06].

2.3.1. Reconocimiento de Patrones de radiación: fingerprinting

En el ámbito de las aplicaciones de localización en entornos de interior, el área en el que se localiza suele ser el interior de un edificio o las vecindades del mismo, escenarios de los que existe información detallada sobre su geometría. La disponibilidad de mapas detallados de las plantas de un edificio es una de las características de las aplicaciones de localización en entornos de interior que pueden ser explotadas por los algoritmos de posicionamiento. Así por ejemplo, en el proceso de localización de un sujeto en el interior de un edificio, si se tiene información detallada sobre la planta del edificio, situaciones en las que el sujeto atravesara paredes o saltase entre plantas podrían ser identificadas y corregidas.

Otra característica única de los sistemas de localización en entornos de interior, es que el tamaño de las áreas a cubrir es mucho menor que en un entorno exterior. Esta diferencia es beneficiosa, ya que sería posible realizar una campaña previa de medidas para calibrar el entorno. El proceso de calibración del entorno consiste en utilizar un nodo móvil y tomar con él métricas de localización provenientes de los nodos baliza. Para ello, previamente se debe dividir el área de interés en una rejilla cuya resolución es el principal factor limitante en la precisión del sistema de localización. Como resultado, tras esta campaña previa de calibración del entorno, los sistemas de localización inalámbrica basados en técnicas de reconocimiento de patrones (también conocida como técnica *fingerprinting*) están ganando atención en las aplicaciones de localización en interiores [BP00].

Dado que cada edificio tiene unas características específicas de propagación de la señal, cada

punto del edificio tendrá sus propias características en términos de las métricas de localización RSS, TOA y/o AOA observadas desde cada nodo baliza. Un sistema de reconocimiento de patrones determina las características particulares del área de interés en términos de la localización del nodo en un proceso de entrenamiento, y este conocimiento se utiliza para desarrollar reglas de reconocimiento. El mayor reto de esta técnica es distinguir posiciones con características similares.

El reducido tamaño del área a cubrir también puede ayudar a realizar un estudio exhaustivo sobre el mejor emplazamiento de los nodos baliza. Esto puede reducir de forma significativa los errores en las métricas de localización provocadas por el efecto del NLOS, sin línea de visión directa (No Line Of Sight, NLOS). Además, la distribución geométrica de los nodos baliza respecto del nodo a localizar es importante y puede ser utilizada en algoritmos de posicionamiento inteligentes, de la misma forma se puede utilizar el mapa del edificio [MBP+09].

La precisión conseguida por este método de localización depende del número de medidas tomadas en la fase de calibración del entorno siendo, en el mejor de los casos, igual a la resolución tomada en la rejilla de puntos cuando se calibró el entorno [RMT+02]. La principal desventaja de este método es el esfuerzo necesario para calibrar el entorno, así como la volatilidad de esta información, ya que cambios en el mobiliario o el mismo movimiento de las personas por el entorno invalidarían los datos recogidos en la etapa previa de calibración [MLM08, KKJ+04].

2.3.2. Tiempo de Llegada

En una red completamente sincronizada, se puede obtener el tiempo que utiliza una señal desde el nodo baliza desde el que fue transmitida hasta alcanzar el nodo a localizar, sin más que conocer los instantes de salida y llegada. A este tiempo se le conoce como TOA (Time Of Arrival). De esta forma, la distancia entre los dos nodos puede estimarse multiplicando el tiempo medido (TOA) por la velocidad a la que viaja la señal por el medio, convirtiendo así las unidades de tiempo en unidades de distancia. Cada estimación de distancia establecerá una línea de posición alrededor de cada nodo baliza, que en el caso de TOA, será una circunferencia de centro el nodo baliza y radio la distancia estimada. Una vez conocida la distancia a al menos tres nodos baliza (para 2 dimensiones) o cuatro nodos (mínimo para 3 dimensiones), la posición es estimada mediante trilateración, esto es, encontrando el punto de intersección de las tres circunferencias correspondientes.

En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo en el que se tienen tres nodos baliza cuya posición es conocida. Si todas las estimaciones de distancia desde el nodo a localizar a cada uno de los nodos baliza fuesen precisas, las tres circunferencias se cortarían en un único punto, y éste coincidiría con la posición del nodo a localizar.

La precisión de los sistemas basados en TOA, depende fundamentalmente del ancho de banda de la señal transmitida y de la resolución con la que se realicen las mediciones temporales [CL02]. Unido al problema anterior, la precisión empeorará en las situaciones de NLOS en las que nodo baliza y nodo a localizar no están en línea de visión directa, por otro lado, situación muy habitual en los entornos de interior. En estos entornos la señal transmitida puede que llegue al receptor únicamente por reflexión, difracción, scattering o tras haber atravesado un obstáculo, experimentando en este último caso una reducción en la velocidad de propagación. Esto implica que la longitud del camino equivalente hasta el receptor es mayor si hubiese visión directa entre

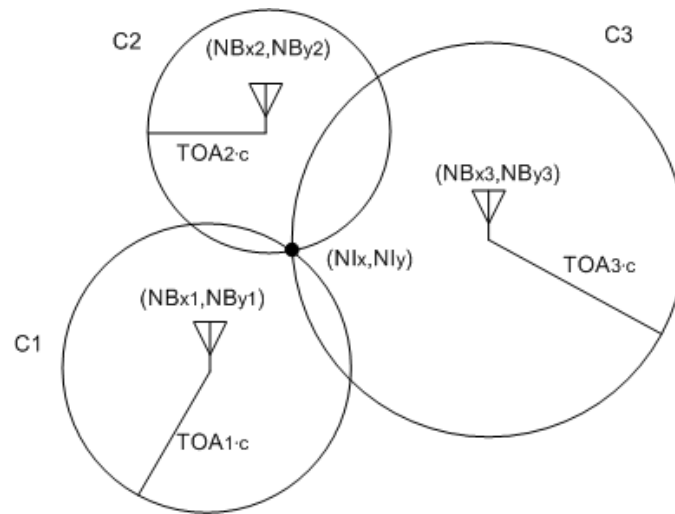


Figura 2.4: Ejemplo de posicionamiento en un sistema TOA con tres nodos baliza

los nodos. Esto provoca que el tiempo empleado por la señal en llegar hasta el receptor sea mayor y, por lo tanto, lo es también la distancia estimada. En la literatura científica se pueden encontrar diversos mecanismos que mejoran o corrigen el efecto del NLOS [MLB+08, Che99].

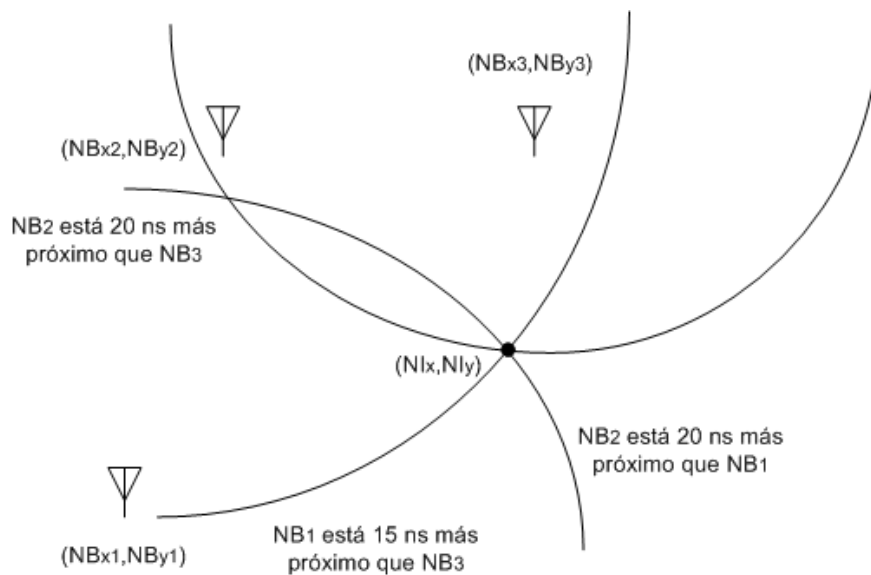


Figura 2.5: Ejemplo de posicionamiento en un sistema TDOA con tres nodos baliza

Habitualmente, en las redes inalámbricas el nodo a localizar no está sincronizado con los nodos baliza, como ocurre en los sistemas GPS donde sólo los satélites están sincronizados. En este caso el problema del sincronismo en el receptor puede ser solucionado tomando como métrica la diferencia entre los tiempos de llegada (TDOA - Time Difference of Arrival) a los diferentes nodos baliza. Mediante estas diferencias en el retardo temporal se puede estimar la posición de dos maneras: calculando el sesgo introducido por la diferencia entre el reloj de los nodos baliza y el nodo a localizar, o traduciendo las diferencias entre los tiempos de llegada a diferentes distancias y encontrando el punto donde se cortan las líneas de posición alrededor de cada nodo baliza. En este caso, puesto que la curva cuyos puntos satisfacen la condición de que el valor absoluto de la diferencia de distancias a dos referencias (en este caso un par de nodos

baliza) sea una constante, es una hipérbola. Ésta será la forma de la línea de posición. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo en el que sólo los nodos baliza están sincronizados. Entonces, desde el nodo a localizar, observando las diferencias en los instantes de llegada entre las señales provenientes de los nodos baliza y convirtiendo estas diferencias de tiempo en diferencias de distancia, se trazan las hipérbolas resultantes. El punto de cruce de las tres hipérbolas coincidirá con la posición del nodo a localizar.

Sin embargo, en la mayoría de redes WLAN desplegadas, ni siquiera los nodos baliza están sincronizados, por lo que se complica sobremanera realizar medidas precisas del TOA o TDOA. En estos casos, se puede caracterizar el retardo temporal a través del RTT (Round-Trip Time).

2.3.3. Tiempo de Ida y Vuelta (RTT)

Existen implementaciones en las que la sincronización de los distintos nodos no es necesaria. Esto es así en los sistemas de localización basados en la medición del tiempo de ida y vuelta de la señal (RTT). En este caso, todas las mediciones temporales son realizadas desde el mismo nodo, evitando de esta manera la sincronización entre los nodos de la red. El método opera de la siguiente forma: uno de los nodos (baliza o nodo a localizar) envía una trama de control al otro extremo (nodo a localizar o baliza) activando así la cuenta del tiempo. El extremo contrario asentirá inmediatamente a dicha trama finalizando la cuenta del tiempo cuando la respuesta ha alcanzado el nodo que inició el intercambio, el tiempo transcurrido será el RTT. En la figura 2.6 se muestra la forma en la que se puede medir el RTT transcurrido en el intercambio de las tramas de control RTS/CTS entre dos nodos inalámbricos que, como se verá, resulta el par de tramas más idóneo para este propósito. Una vez se conoce el RTT, el TOA desde el nodo a localizar al nodo baliza puede ser estimado dividiendo entre dos el tiempo resultante de restar, al RTT, el tiempo de procesamiento desde que se recibe la primera trama hasta que se envía la respuesta [LS02].

De todas formas, para poder estimar la distancia que separa ambos nodos, no es necesario conocer ni el tiempo de procesamiento en el intercambio de tramas de control en el nodo baliza, ni la velocidad de las señales por el medio, aire, es suficiente con asegurar que estos parámetros son aproximadamente constantes. De esta forma, utilizando un modelo de regresión lineal simple, se pueden estimar distancias a partir del RTT [BMP+09].

2.3.3.1. Elección del par de tramas de control: Mecanismos RTS/CTS

El RTT debe ser medido entre dos tramas consecutivas [Bah09], esto es, uno de los nodos ha de enviar una trama que sea afirmada en el menor tiempo posible por el nodo que la recibe, y este tiempo ha de estar controlado, es decir, debe ser lo más constante posible. Además, se ha de buscar que estas tramas tengan la menor longitud posible para evitar inyectar tráfico innecesario en la red, y desaprovechar la menor cantidad posible de ancho de banda.

Un ejemplo de ello es el estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.11, que incluye una función básica de coordinación distribuida (DCF, Distributed Coordination Function) el cual consiste en un protocolo de control centralizado de acceso al medio (MAC, Media Access Control) que soporta servicios libres de colisión y servicios limitados en el tiempo. DCF utiliza

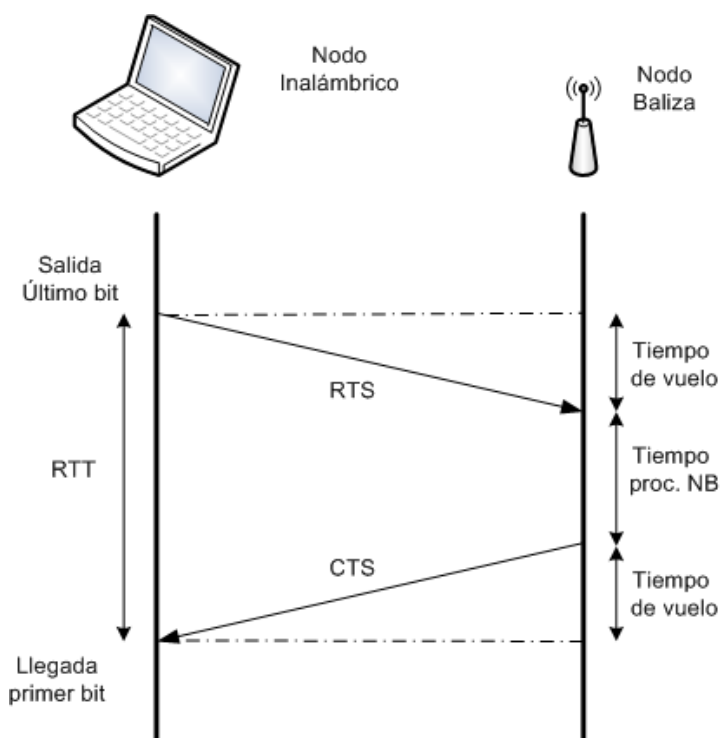


Figura 2.6: Intercambio de tramas RTS/CTS entre dos nodos inalámbricos. Descripción del RTT

el mecanismo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) como protocolo de acceso básico al canal para transmitir datos de manera asíncrona durante el tiempo de conexión. Además, DCF utiliza dos técnicas de *handshaking* para la transmisión de tramas. La opción por defecto es un mecanismo de *two-way handshaking* denominado mecanismo de acceso básico. El otro es un mecanismo *four-way handshaking* usado para combatir los efectos de las colisiones llamado RTS/CTS [Gas02].

El procedimiento RTS/CTS consiste en el envío, por parte del nodo que quiere transmitir, de una trama RTS. Tras el periodo de espera SIFS (Short Inter-Frame Space), el nodo receptor responderá con una trama CTS indicando al primero que el medio está libre para el envío de datos [IEEE07]. Durante un tiempo llamado CTS-Timeout, el nodo transmisor podrá transmitir la trama de datos. En la figura 2.7 se indica la forma en que interactúan dos nodos inalámbricos en el intercambio de tramas RTS/CTS antes del envío de datos.

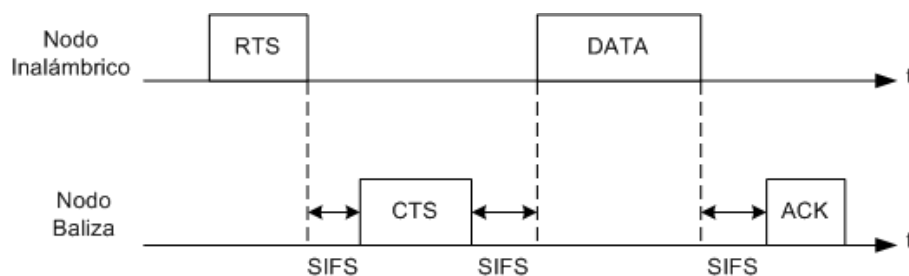


Figura 2.7: Intercambio de tramas RTS/CTS

En las redes de comunicación inalámbrica, el tiempo SIFS es un tiempo que garantiza un

intervalo de guarda entre dos bloques en una transmisión para prevenir que éstos interfieran el uno con el otro. Normalmente con un valor de $10 \mu s$, es el menor retardo posible en cualquier versión de IEEE 802.11. También, SIFS tiene máxima prioridad frente a otros tiempos de tramas, como son DIFS (DCF Inter-frame Space) tiempo mínimo que debe permanecer al anterior, pero solo usado por el PCF (Point Coordination Function) [Gas02].

Resumiendo, en el mecanismo RTS/CTS, se incurre en el menor tiempo posible de entre todos los pares de tramas de intercambio, además de ser independiente de la carga de tráfico. Por último, cabe mencionar que el mecanismo de control de acceso al medio RTS/CTS es opcional en las redes de comunicación inalámbrica y algunos de los primeros dispositivos no lo incluían. Sin embargo, está implementado en la mayoría de redes actuales para grandes tramas de datos.

2.3.4. Ángulo de Llegada

El método de localización AOA, también llamado triangulación, se basa en la medición del ángulo de incidencia de la onda recibida en los nodos baliza proveniente del nodo a localizar. La medición del ángulo puede ser llevada a cabo de dos maneras: mediante una antena direccional que barre todas las direcciones de interés o mediante antenas *multiarray*. El primer tipo requiere operaciones mecánicas lentas e ineficientes energéticamente, por lo que es más utilizado el segundo método. Mediante antenas *multiarray*, la distancia adicional recorrida por la señal hasta llegar a cada una de las antenas separadas espacialmente se utiliza para determinar el ángulo de incidencia de la misma.

Por lo tanto, los nodos baliza necesitan estar provistos de estas antenas *multiarray*, algo muy extraño en los nodos inalámbricos actuales. Por otro lado, la ventaja de este método respecto a los anteriores radica en que sólo se necesita conocer el ángulo de llegada de dos nodos baliza para estimar la posición del nodo a localizar en dos dimensiones. Como se muestra en la figura 2.8, la posición del nodo a localizar se estima como el punto de intersección entre las rectas que definen los ángulos a cada uno de los nodos baliza. Sin embargo, la precisión disminuye considerablemente cuando el nodo a localizar se encuentra en la línea que une los dos nodos baliza.

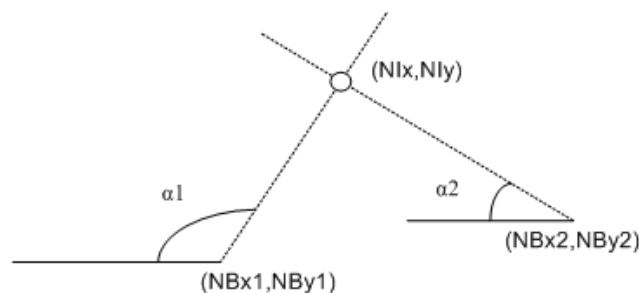


Figura 2.8: Ejemplo de posicionamiento en un sistema AOA con dos nodos baliza

La resolución obtenida con el método AOA depende de la configuración de la antena, siendo la máxima posible $2 \cdot d \cdot \sin(\alpha/2)$ donde d es la distancia entre las antenas y α es la resolución angular [GG05]. También, ésta empeora cuando la distancia entre el nodo a localizar y los nodos baliza aumenta, pero también hay que decir, que mejora aumentando el número de antenas en el array y la separación entre las mismas. La precisión de un sistema de localización AOA es

normalmente inferior a la precisión de los sistemas basados en TOA, aunque puede alcanzar una resolución aceptable cuando se emplea en distancias cortas [Qi06].

Este método se ve afectado también por el efecto NLOS cuando, por ejemplo, el camino directo es bloqueado y una señal reflejada es identificada erróneamente como el camino directo, eligiendo como ángulo de llegada un ángulo equivocado. En [Xio98,LCS+97] se pueden encontrar varias técnicas que reducen dicho efecto.

2.3.5. Nivel de Potencia Recibido

Generalmente, en los sistemas de localización inalámbrica, la posición ha sido estimada a partir de la métrica RSS por ser una métrica de localización simple de obtener con cualquier nodo inalámbrico convencional. Los métodos de localización inalámbrica más utilizados con esta métrica son el método *fingerprinting* y un método que utiliza los modelos de propagación del canal entre nodos.

En el primer caso (sección 2.3.1), en la etapa de calibración del entorno, se registran en un mapa los niveles de potencia medidos respecto a diferentes nodos baliza para cada una de las posibles posiciones donde estará el nodo a localizar. Posteriormente, en la etapa de localización, se recoge la potencia recibida respecto a los nodos baliza y la posición se determina encontrando el resultado que mejor encaja con el mapa de mediciones RSS registrado en la etapa de calibración [NDA04]. En el caso de las técnicas basadas en *fingerprinting*, la precisión depende directamente de la granularidad con la que se ha creado el mapa. Además, es totalmente vulnerable a cambios en el entorno con respecto a cuando se realizó la etapa de calibración.

Los métodos basados en modelos de propagación utilizan la atenuación de la señal para obtener la distancia entre el nodo baliza y el nodo a localizar, la cual aumenta al aumentar la distancia entre ambos nodos. Puesto que la potencia de transmisión del nodo baliza es constante y conocida, y el interfaz del nodo a localizar es capaz de obtener la potencia recibida, la atenuación producida en la transmisión se puede obtener fácilmente restando una de otra. Este valor de atenuación depende principalmente de la distancia y del efecto del bloqueo causado por el multitrayecto. Algunos ejemplos de modelos de propagación son los conocidos modelos de Okumura-Hata [Oku68,Hat80] o Egli [Egl57]. En los métodos basados en un modelo de propagación, la precisión depende de cómo de bien se ajuste dicho modelo a las condiciones reales del medio [Qi06]. De la misma forma que con el método que utiliza la métrica de localización TOA, se obtiene la posición estimada mediante trilateración. Es una técnica muy utilizada ya que cualquier nodo inalámbrico convencional implementa la función de medición de la métrica RSS mediante el RSSI (Received Signal Strenght Indication).

2.4. Metodología genérica de localización en RF

Hay una gran variedad de sistemas de localización inalámbrica, todos ellos siguen una misma metodología, estimar la posición del nodo a localizar mediante un algoritmo cuyas informaciones de entrada son las métricas de localización obtenidas de la señal recibida [PLM02].

En la figura 2.9 se muestra el diagrama general de bloques funcionales de un sistema de

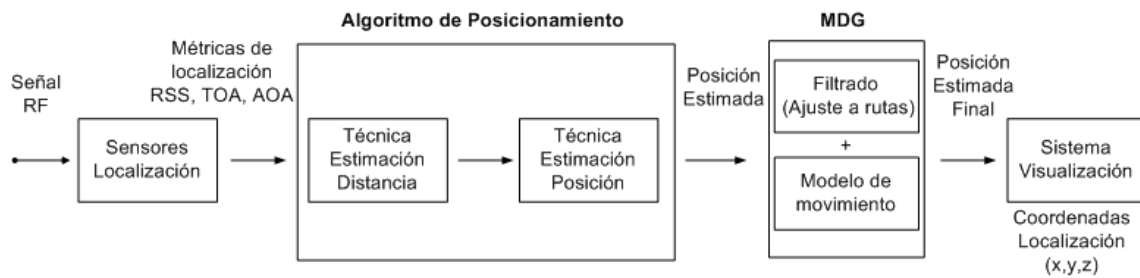


Figura 2.9: Metodología

localización inalámbrica. Los elementos principales del sistema son: un número de sensores de localización cuyo cometido es recoger métricas relacionadas con la posición relativa del nodo a localizar respecto de la posición conocida de unos nodos baliza, un algoritmo de posicionamiento que procesa las métricas reportadas por los sensores de localización para estimar las coordenadas del nodo a localizar, y un sistema de visualización que muestra la posición estimada del nodo. Los datos de localización pueden indicar la dirección aproximada de llegada de la señal o la distancia aproximada que separa el nodo a localizar de cada uno de los nodos baliza que se encuentran dentro de su rango de cobertura. El ángulo de llegada (AOA) es la métrica que se usa en los sistemas basados en la dirección de llegada, mientras que el nivel de potencia o el retardo temporal de la señal recibida son las métricas utilizadas para estimar distancias. Es importante destacar que, si se quiere mantener un nivel de precisión determinado, a medida que las métricas de localización son menos fiables, la complejidad del algoritmo de posicionamiento aumenta. El sistema de visualización puede encontrarse en el mismo nodo a localizar, ser accesible de forma local en una LAN (*Local Area Network*), o publicarse de una forma universal a través de un servicio web. Por supuesto, a medida que el horizonte de accesibilidad a la información aumenta, el diseño del sistema de visualización puede hacerse cada vez más complejo.

A la hora de diseñar nuestro sistema de localización inalámbrica RF en un entorno de interior, se considerará una red de nodos de referencia o nodos baliza en posiciones fijas y conocidas con capacidades de comunicación con el nodo móvil a localizar. Dado que la estimación de la dirección de llegada de la señal requiere de antenas complejas y dispositivos dedicados, en este Trabajo Fin de Grado se utilizará la información del RSS como métrica de localización para estimar la posición del nodo a localizar. Cualquier nodo inalámbrico convencional implementa actualmente una funcionalidad que le permite cuantificar el RSS de los nodos vecinos. Por lo tanto, a partir de la información del RSS, el algoritmo de posicionamiento se divide en dos sub-bloques: una técnica de estimación de distancias que procesa las métricas de localización para estimar la distancia que separa el nodo a localizar de cada uno de los nodos baliza que se encuentran dentro de su rango de cobertura; y un segundo con una técnica de estimación de la posición que a partir de las distancias estimadas y la posición conocida de los nodos baliza es capaz de estimar la posición del nodo a localizar.

Las condiciones de propagación del canal de radio en los entornos de interior se caracterizan por el multitrayecto y la escasa probabilidad de que los nodos inalámbricos estén en línea de visión directa. Por lo tanto, las dos fuentes de error más comunes en los sistemas de localización en entornos de interior son el multitrayecto y el NLOS, debido al bloqueo de la señal por la presencia de obstáculos. Para reducir el efecto de estas fuentes de error se ha incluido un bloque después de la estimación de la posición, donde se implementa un filtro haciendo uso de grafos descriptivos del entorno y modelos de movimiento en función de la velocidad del nodo a localizar

o nodo móvil, todo ello denominado grafo de descripción métrica o MDG (Metric Description Graph).

2.5. Tecnologías estándar en RF

Buscando los artículos o publicaciones de los últimos años referentes a sistemas de localización o posicionamiento en entornos de interior, se ha conseguido realizar una pequeña clasificación dependiendo de la tecnología utilizada. En la figura 2.10 se muestra gráficamente el resultado, donde se puede apreciar el predominio de las tecnologías de RadioFrecuencia.

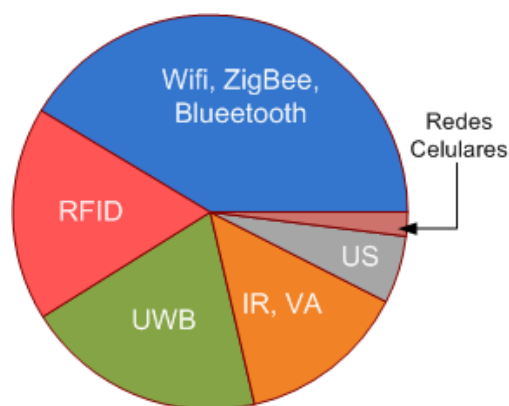


Figura 2.10: Predominio de tecnologías RF en los sistemas de localización en interiores

Dentro de la tecnología RF, se analizará que tecnologías de comunicación inalámbrica son las más utilizadas actualmente en el desarrollo de sistemas de localización inalámbrica en entornos de interior. Estos sistemas son Bluetooth, RFID, UWB, Wifi y ZigBee. Cada una de ellas por separado tiene sus propias características y aplicaciones, que se explicarán en esta sección, pero se puede decir que son las que se utilizan casi por completo en el mercado de los sistemas de localización inalámbrica.

2.5.1. Bluetooth

Bluetooth es una tecnología diseñada para redes de comunicación inalámbrica de acceso personal que se creó para sustituir al cable en los usuarios finales. Desde su estandarización, millones de dispositivos incorporan esta tecnología, como impresoras, altavoces, teléfonos móviles, PDAs (Personal Digital Assistant), ordenadores portátiles, etc. Trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz. Las ventajas de esta tecnología, además de su amplia presencia en los dispositivos, son su bajo coste y el bajo consumo de energía que necesita, dotándolos de gran autonomía. Esto es debido a su menor potencia de transmisión y a que, desde la versión v1.2, no es necesario establecer una conexión para comunicar dos dispositivos. Sin embargo, aunque el alcance está entre los 10 y los 100 m según la clase de dispositivo Bluetooth utilizado, normalmente es menor que el de otras tecnologías RF, como la tecnología WiFi.

Existen algunas soluciones para sistemas de localización inalámbrica utilizando Bluetooth. Las más comunes están basadas en proximidad [ABC+03], estableciendo un área donde se

encuentra el nodo a localizar. Otras más precisas, utilizan el nivel de potencia recibido para estimar distancias y posteriormente obtener la posición del nodo a localizar mediante trilateración [LCC+05, FKZ+03]. Sin embargo este método, como se comentó en la sección anterior, se ve muy afectado por el NLOS y el multitrayecto. La tasa de error de bit, medida durante la comunicación de los dispositivos, también se puede usar para estimar la distancia entre el nodo a localizar y varios nodos baliza [TC05], aunque en [MT05] se demuestra que en entornos de interior esta tasa es difícilmente utilizable para estimar distancias. Existen también técnicas basadas en *fingerprinting*, consiguiendo precisiones de 2.5 m [KLF+09], sin embargo, requieren una ardua tarea de calibración y son poco robustas a cambios en el entorno. Además, el proceso de detección de un dispositivo Bluetooth requiere de al menos 10 s para completarse [KLF+09] disminuyendo en gran medida el rendimiento y el tiempo de actualización.

2.5.2. RFID

La identificación por RadioFrecuencia o RFID es la tecnología inalámbrica por excelencia para la identificación de personas u objetos, e incluso para la identificación de personas u objetos, aunque también se utiliza para la localización de los mismos. RFID puede operar en diversas bandas, en torno a 868 MHz o 2.4 GHz. Existen aproximadamente 140 estándares ISO diferentes para RFID diseñados para una amplia gama de aplicaciones. Entre las que destaca el control de inventario y la automatización en los procesos industriales.

Atendiendo a la identificación de personas u objetos mediante RFID, una posibilidad interesante es utilizar tags pasivos, que pueden ser alimentados a distancia por un lector. Éste extrae la información del *tag*, que ha de encontrarse a corta distancia (máximo unos pocos metros), para posteriormente buscarlo en una base de datos. Alternativamente, existen *tags* activos que pueden ser leídos desde mayores distancias. Los lectores RFID disponen de dos interfaces: una es la que se comunica con los *tags*, y otra es la que se emplea para la comunicación con los servidores, generalmente implementando los estándares de comunicación IEEE 802.11 o IEEE 802.3.

En cuanto a la localización de personas u objetos, se han propuesto soluciones con este tipo de tecnología para gran parte de los métodos de localización presentados en la sección 2.3. Así, se encuentran sistemas basados en el nivel de potencia recibido con *tags* activos [HWB00, GN09], que consiguen una precisión de 1 m en la localización, o con *tags* pasivos [OHO+07]; sistemas que utilizan TDOA y tags activos con la necesidad de sincronización entre ciertos *tags* de referencia [SPF04]; técnicas basadas en *tags* pasivos o el AOA respecto a al menos dos lectores RFID, que requieren el diseño de varias antenas y arrays de antenas [ZAK07]. Aunque también aparecen en la literatura soluciones basadas en mallas de *tags* de referencia distribuidos regularmente a lo largo y ancho del área de cobertura [NLL+03].

Aunque RFID es una alternativa bastante rentable para el desarrollo de sistemas de localización dedicados, no es muy normal encontrar esta tecnología inalámbrica salvo en soluciones específicas para otras aplicaciones. También, el elevado coste de los lectores RFID y el gran número de ellos que se necesitan para ofrecer una buena cobertura en el sistema de comunicación y precisión en el sistema de localización, hace que no sea una opción muy rentable.

2.5.3. UWB

Actualmente los sistemas de comunicación, tratado de imágenes y sistemas de posicionamiento que implementan el espectro UWB están consiguiendo una gran importancia dentro de la comunidad científica. Una señal UWB se define como aquella que posee un ancho de banda absoluto de al menos 500 MHz o un ancho de banda relativo mayor del 20 %. La principal característica de las señales UWB es que pueden coexistir con otros sistemas de comunicación transmitiendo en el mismo rango de frecuencias debido a su elevado factor de ensanchamiento y a su baja densidad espectral [GTG+05].

Los sistemas de localización inalámbrica basados en UWB presentan un gran potencial para conseguir errores en la estimación de la posición del nodo a localizar inferiores a 1 m, además de destacar por su bajo consumo. Estos sistemas son muy adecuados para la localización inalámbrica puesto que el uso de anchos de banda muy grandes ofrece por ejemplo una elevada resolución espacial. Por ello, ciertos sistemas ofrecen una localización precisa como es el caso de los sistemas de comunicación inalámbrica basados en TOA [FDM+06, JDW08, DCF+09]. Estos sistemas explotan la elevada resolución temporal que se consigue con las señales UWB estimando el TOA de la primera señal que llega al receptor de forma precisa. También se han desarrollado sistemas de posicionamiento basados en UWB combinando algoritmos TDOA y AOA que consiguen precisiones de centímetros [SGG08]. Esto es debido al gran ancho de banda de la señal empleada, a su capacidad de propagación a través de los obstáculos del medio, y a la inmunidad a los problemas derivados del fenómeno de la propagación multitrayecto [SK04].

Aunque los sistemas UWB poseen muchas ventajas, no es una tecnología muy desarrollada en la actualidad. Por lo tanto, este tipo de sistemas presenta actualmente unos costes elevados.

2.5.4. WiFi

La tecnología WiFi es un sistema de envío de datos sobre redes inalámbricas utilizando ondas de radio. WiFi basa sus especificaciones del nivel físico y MAC en las definiciones del estándar IEEE 802.11. El estándar dispone de varias versiones, siendo las más extendidas las versiones *a*, *b*, *c* y *n*. Las versiones *b* y *g*, que operan en la banda de 2.4 GHz son compatibles entre sí, mientras que la versión *a* opera en la banda de los 5 GHz y no es compatible con las anteriores. La versión más reciente de las cuatro, el estándar IEEE 802.11n, es compatible con las tres anteriores, y permite operar en ambas bandas y a tasas mayores de 100 Mbps.

Entre los sistemas de localización desarrollados con esta tecnología, los más habituales utilizan como métrica el nivel de potencia recibido, siendo la opción más común los sistemas basados en *fingerprinting* [FLL08]. Aunque también se puede implementar un sistema empleando RSS sin la necesidad de una etapa previa de calibración del entorno que resulta sobretodo poco robusta ante los posibles cambios del entorno [MBL+09]. También existen sistemas basados en TOA, que emplean el RTT para estimar la distancia entre el nodo a localizar y los nodos baliza [BMP+09]. Aunque se han realizado algunas soluciones orientadas en este sentido [CBI07], éstas necesitan conocer el tiempo de procesamiento, así como la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas por el medio, que suponen nuevas fuentes de error del sistema, lo cual se puede evitar con modelos de regresión [Bah09]. Los sistemas de localización con WiFi que emplean TDOA presentan los problemas ya mencionados de sincronización. Por ejemplo,

en [YOT+05] se propone un sistema basado en TDOA para IEEE 802.11 que consigue precisiones en la estimación de la posición del nodo a localizar de 2.4 m. Para ello, son necesarios 10 nodos baliza colocados en las mejores posiciones posibles de una habitación en la que sólo unas pocas columnas entorpecen la línea de visión directa entre los nodos, además de requerir la sincronización entre los nodos baliza y tres antenas en el nodo a localizar.

A pesar del potencial de esta tecnología inalámbrica, aún no se han conseguido sistemas de localización inalámbrica lo suficientemente precisos, o que no requieran grandes inversiones y/o una compleja etapa previa de calibración del entorno. Tampoco se han propuesto esquemas que permitan medir con precisión retardos temporales sin incurrir en grandes costes y/o cambios importantes en el hardware.

2.5.5. ZigBee

La especificación ZigBee, aprobada en 2004, ha sido diseñada para ser el estándar de comunicación inalámbrica para el control remoto en el sector industrial. ZigBee basa sus especificaciones del nivel físico y MAC en las definiciones del estándar IEEE 802.15.4. Intenta captar el control de las aplicaciones industriales que no requieren grandes tasas de datos, pero que si deben tener bajo consumo de potencia, bajo coste, así como sencillez en el uso. Opera en torno a la frecuencia de 2.4 GHz. En una red ZigBee se distinguen tres tipos de nodos: el coordinador, que es el único nodo capaz de comunicarse con otras redes; los *routers*, que pueden enviar datos provenientes de otros dispositivos; y los *end devices*, que pueden transmitir datos locales a los dos anteriores permaneciendo inactivos el resto del tiempo.

Actualmente se están proponiendo varios sistemas de localización inalámbrica basados en esta tecnología, existiendo por ejemplo, soluciones basadas en TDOA, que utilizan un método multi-fase para realizar medidas exactas de tiempo, aunque necesitan implementar algún protocolo de sincronización entre los lectores de la red [CKK+07]. Asimismo, también aparecen soluciones basadas en el nivel de potencia recibido [CFR+09]. En este caso, proponen un algoritmo de estimación de máxima verosimilitud del nivel de potencia recibido a partir de modelos de propagación log-normales. También se han propuesto métodos para la estimación de distancias mediante TOA añadiendo pequeños cambios en el hardware [CPG+08]. Algunos estudios están orientados al diseño de antenas impresas para diferentes entornos que mejoren las prestaciones de los diseños de localización inalámbrica anteriores [CCM+08].

Uno de los puntos débiles de este tipo de dispositivos es que actualmente existen problemas de compatibilidad e interoperabilidad entre los módulos de RF que trabajan con los protocolos IEEE 802.15.4 y ZigBee, por lo que actualmente la elección del módulo de comunicación es un factor crítico a la hora de crear la red.

2.6. Discusión Crítica

Una de las principales limitaciones de los sistemas de posicionamiento GNSS (Global Navigation Satellite System) es el hecho de que las señales provenientes de los satélites no pueden ser utilizadas en el interior de edificios. Por lo tanto, se deben utilizar infraestructuras inalámbricas alternativas que solucionen la carencia de cobertura de los satélites en dichos entornos.

Entre las tecnologías más importantes se pueden destacar: IR, VA, US y RF. La tecnología IR, como tecnología en un sistema de localización inalámbrica, tiene su mercado en los sistemas de proximidad, estando limitado su uso a aplicaciones que se desarrollen en áreas de interior restringidas donde se pueda garantizar una línea de visión directa entre los nodos IR. La tecnología VA, además de requerir de visión directa, necesita de una etapa de calibración previa del entorno, o por lo menos, un conocimiento previo de la distribución del interior para poder desarrollar un sistema de localización inalámbrica. Igualmente, la tecnología US necesita que sus nodos estén en línea de visión directa, restringiendo su uso a entornos de interior pequeños y con pocos obstáculos. Requisitos todos ellos que les hacen ser tecnologías poco flexibles, además de poco rentables cuando se van a utilizar en entornos interiores extensos, como por ejemplo toda una planta de un edificio. Éstas son desventajas claras frente a los sistemas de localización por RF que, aunque la precisión en la estimación del nodo a localizar de estos últimos sea peor, pueden adaptarse de forma dinámica a los cambios en el entorno, cubriendo grandes zonas de interior con pocos nodos de red.

A partir de la tecnología RF, para desarrollar un sistema de localización inalámbrica existen varios métodos de localización. Así por ejemplo, la precisión en la estimación de la posición del nodo a localizar por las técnicas de reconocimiento de patrones dependen de la resolución de la rejilla tomada en la etapa de calibración, con los conocidos inconvenientes que tiene la calibración de un entorno por la volatilidad que tiene la información tomada en esa etapa. Por otro lado, el método AOA requiere de antenas especiales aún no desplegadas en las redes de comunicación inalámbrica convencionales. Los métodos TOA y TDOA necesitan que todos los nodos de la red o por lo menos los nodos baliza estén sincronizados, a parte de necesitar un cambio importante en el *hardware* de los mismos, requerimientos muy costosos de llevar a la práctica en las redes inalámbricas habituales. Sin embargo, el RTT es una métrica de localización tomada únicamente por el nodo a localizar, evitando la necesidad de que los nodos estén sincronizados, aunque se sigue necesitando modificar el *hardware* existente. Por el contrario, la métrica de localización RSS es muy fácil de extraer de cualquier nodo inalámbrico a través del indicador RSSI, ya que necesitan de ésta información para poder interactuar con el resto de nodos vecinos de la red.

Dentro de las tecnologías inalámbricas que operan en el interior de edificios, se pueden destacar Bluetooth, RFID, UWB, WiFi y ZigBee. Pese a su bajo coste y bajo consumo, Bluetooth es una tecnología de proximidad, de bajo rendimiento en los sistemas de localización inalámbrica. RFID es una tecnología de identificación específica poco rentable para el desarrollo de sistemas de localización dedicados. UWB pese a su gran potencial en los sistemas de localización inalámbrica dado el gran ancho de banda que utilizan, su uso aún no es común y presenta un coste elevado. WiFi es una tecnología inalámbrica capaz de ofrecer buen nivel de cobertura en toda una planta de un edificio con pocos nodos baliza, está muy extendida y es de bajo coste. Un sistema que utiliza la tecnología WiFi es el denominado Sistema Ekahau, que es un sistema del que se ha hecho uso y del cual se analizarán sus características más destacadas a continuación.

2.6.1. Análisis de un sistema WiFi comercial: el RTLS de Ekahau

El sistema RTLS (Real Time Location System) de la empresa Ekahau (<http://www.ekahau.com>) es un sistema de localización en interiores que utiliza la tecnología WiFi para detectar un móvil o balizas en un entorno interior extenso. Tiene un interfaz simple para el usuario, figura 2.11, y permite cargar gran cantidad de planos de edificios. Incluye tags o balizas móviles que pueden ser portadas por varios usuarios con el fin de localizarlos en la zona interior deseada.

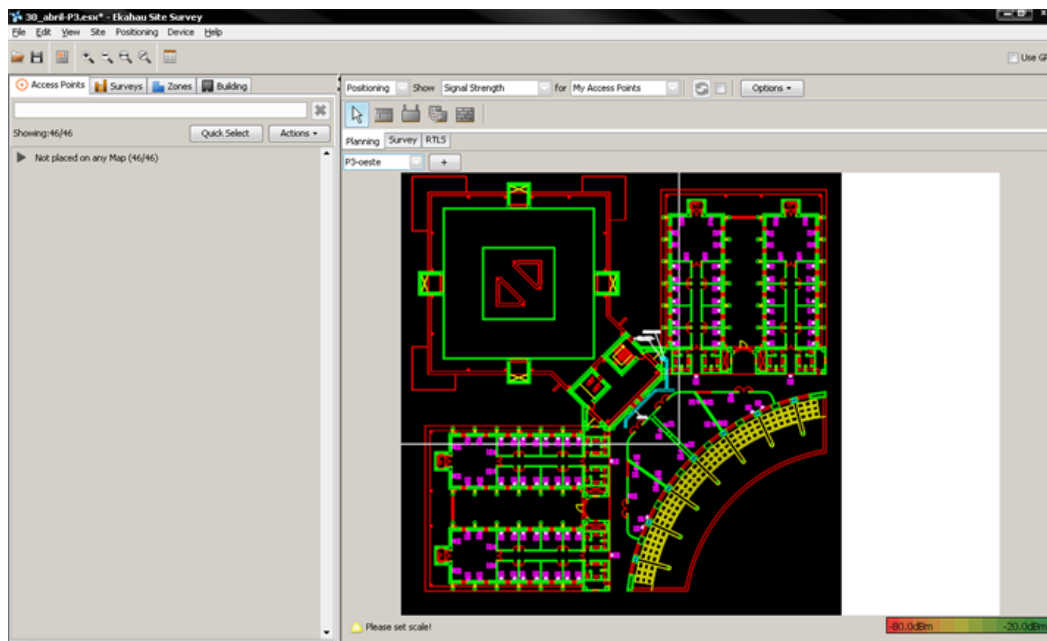


Figura 2.11: Interfaz de usuario del Sistema Ekahau

De las características indicadas anteriormente sobre la tecnología WiFi indicar que al ser un sistema privado, su coste es relativamente alto. También, indicar que en el edificio en el cual se desea introducir este sistema, se tiene una densidad de balizas WiFi baja por lo que la fortaleza de la señal en ciertas zonas es limitada, figura 2.12, lo que reduce la precisión del sistema.

Por ultimo indicar que este tipo de sistemas necesita una calibración inicial de todo el área en el cual se desea utilizar, lo que supone una tarea ardua y compleja, figura 2.13.

Por todas las razones descritas en la sección anterior, se desestima la utilización de la tecnología WiFi y se comienza a estudiar la posibilidad de emplear tecnología ZigBee. ZigBee al igual que el WiFi esta muy extendido, es de bajo coste y tiene el añadido que en los edificios modernos se hacen necesarios todo tipo de sensores distribuidos por ellos (Sensor Network), tanto para captar variables ambientales (temperatura, iluminación, etc.) como de seguridad (presencia, etc.).

2.6.2. Conclusiones

Por todo lo descrito en las secciones anteriores, las tecnologías más convenientes para el desarrollo de un sistema de localización en interiores son la tecnología WiFi y la tecnología ZigBee. También se han indicado las diferencias entre ambas que hacen más fácil la elección de una tecnología u otra.

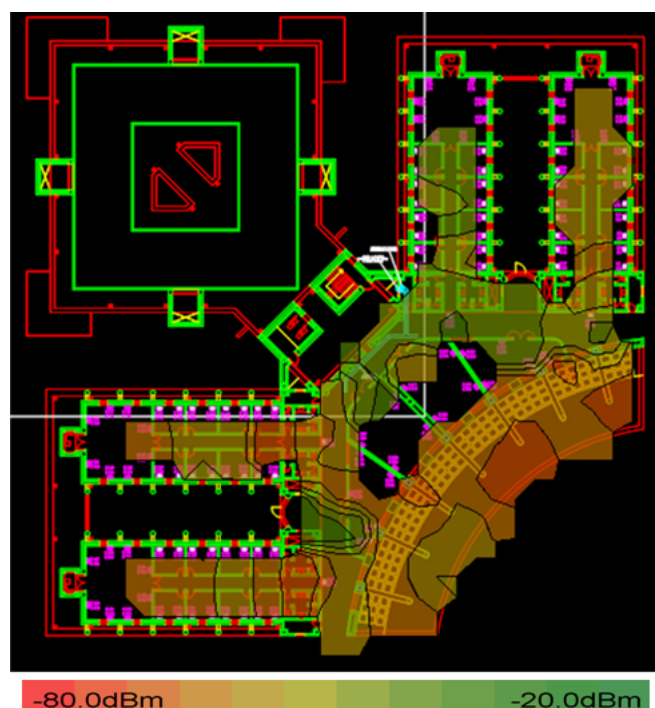


Figura 2.12: Fortaleza de la señal WiFi en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

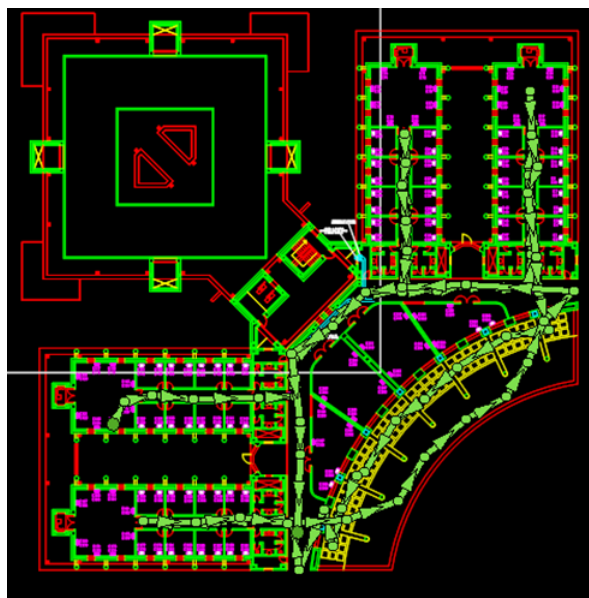


Figura 2.13: Fase de calibración del Sistema Ekahau en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

Quizás también indicar que las redes en malla (descritas en sección 4.2.3) que utiliza la tecnología ZigBee, ofrecen ventajas en ahorro energético y mayor seguridad en la transmisión de datos ya que permite establecer rutas multi-camino, con itinerarios alternativos en caso de que uno o más nodos se bloqueen o queden fuera de servicio. Por último, tras un estudio comparativo realizado por General Electric Company, GE Appliances & Lighting [DNW10], entre la tecnología ZigBee y WiFi, da como resultado que una red WiFi consume de promedio 2.2 veces más

que una red ZigBee. WiFi presenta ventajas frente a ZigBee en la duración de los períodos de transmisión, lo que significa un importante ahorro energético, que sin embargo no es suficiente para compensar la mayor eficiencia de ZigBee en los períodos de no-transmisión. Por último, decir que las balizas ZigBee se podrían utilizar para desplegar una red de sensores ambientales, o al revés, utilizar una red de sensores ambientales (termostatos de calefacción, medidores de humo, etc.) para hacer localización.

En consecuencia, desplegar un sistema de sensores inalámbricos con tecnología ZigBee es una opción muy interesante para obtener una red sensorial con costes reducidos de instalación, aún en edificios antiguos, por lo que será la tecnología elegida.

Capítulo 3

Modelado y Simulación del Sistema de Localización RF en interiores

En este capítulo se describe detalladamente el diseño propuesto del sistema RF para localización en entornos interiores. En capítulos posteriores se realizarán pruebas del sistema desarrollado en un entorno real.

Siempre que se realiza un modelo teórico de un sistema, es importante ajustarse lo máximo posible al comportamiento real de cada uno de los elementos que lo forman. Por tanto, en los siguientes apartados se describen los modelos de cada uno de los elementos que forman el sistema, a partir de la información proporcionada por el fabricante y estudios realizados en el caso de los componentes físicos como las balizas de referencia (dispositivos CC2430 de Texas Instruments), y mediante modelos matemáticos ya creados para otros factores como el modelado de RF en interiores.

Para finalizar en la última sección de este capítulo se representará el diagrama total del sistema propuesto, indicando la interconexión de los distintos bloques y/o modelos matemáticos utilizados, además del algoritmo utilizado para estimar la posición del móvil a partir de toda la información simulada.

3.1. Estructura física del Sistema de Localización RF

La estructura física del sistema de localización RF propuesta en este Trabajo Fin de Grado se ha definido para obtener la información que permita la localización de un móvil en un entorno interior extenso. En la figura 3.1 se muestra un esquema general del sistema propuesto formado por un nodo coordinador de red, una serie de balizas de referencia y los nodos móviles que se pretenden localizar.

El nodo coordinador es el encargado de controlar la red ZigBee (nodos conectados, identificación de la red, etc.); además hace posible la gestión global del ILS (Indoor Location Systems) o una subred del mismo desde un PC a través de una conexión serie. Los nodos o balizas de referencia tienen una doble función: por un lado son los encargados de rutear los datos que circulan por la red; por otro sirven al nodo móvil como referencia para calcular su posición. Por último, en el sistema actual el nodo móvil es capaz de calcular su posición y enviarla, si procede, al coordinador y de ahí al sistema de gestión; se trata en consecuencia de un sistema

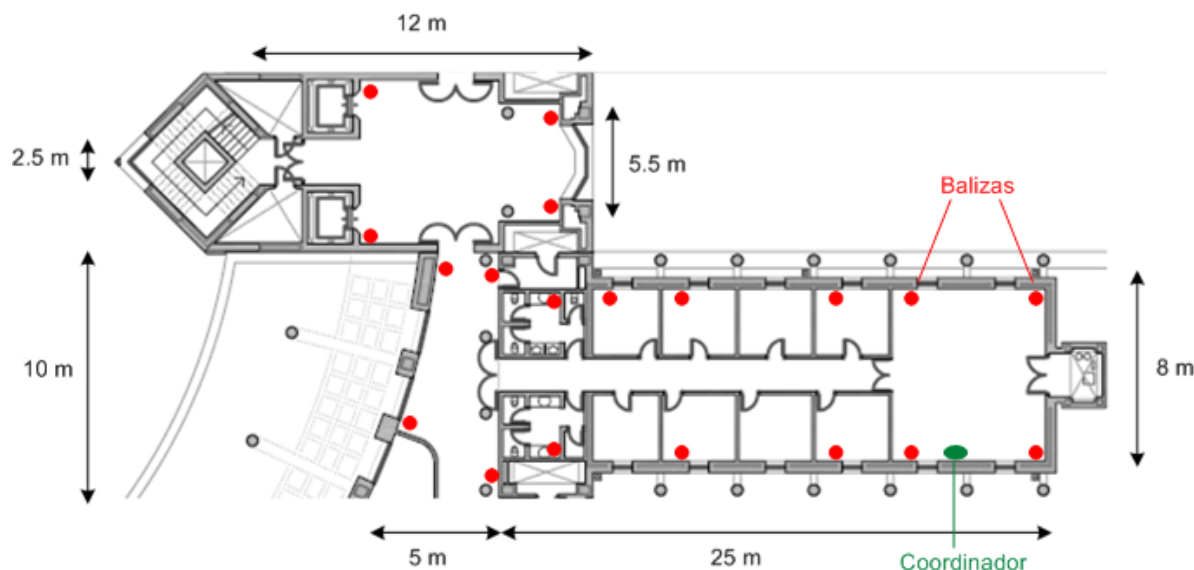


Figura 3.1: Estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá

descentralizado, en donde la tarea de localización reside en el nodo móvil.

Como dispositivos físicos, se han utilizado los de la familia ZigBee de Texas Instruments [TI11]; en concreto, el CC2430 para el coordinador y los nodos de referencia; y el CC2431 para el nodo móvil.

En el sistema experimental se han desplegado una baliza en cada despacho y hasta cuatro balizas en espacios más grandes como laboratorios, así el sistema tendrá la capacidad de proporcionar al nodo móvil información más que suficiente, procedente de las balizas o nodos de referencia, para posicionarse en el entorno. Debido a las técnicas utilizadas para posicionamiento en dos dimensiones (2D), y que se explicarán en el capítulo 4, el nodo móvil necesita recibir información de al menos 3 balizas, y para posicionamiento en tres dimensiones (3D) un mínimo de 4 balizas. Por lo tanto el objetivo de este simulador, es conocer a partir del entorno y de las características de los dispositivos empleados, el efecto de la distribución de balizas (número y posición) sobre la precisión del sistema. En nuestro caso el sistema propuesto parte con un número de 19 balizas distribuidas de forma uniforme por el entorno como se muestra en la figura 3.1.

3.2. Modelado del sistema RF

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado un sistema con dispositivos que utilizan tecnología RF ZigBee, para la localización y posicionamiento de personas y objetos en interiores extensos, denominados genéricamente ILS. En esta sección se explicarán los modelos utilizados para la simulación de cada uno de los elementos que forman este sistema. Cada modelo se diseña de forma independiente, de manera que la unión de todos ellos simule el comportamiento del sistema completo. Esta independencia permite tratar cada elemento por separado, dando la posibilidad de rediseñar de nuevo sus características si fuera necesario, sin perjudicar el resto de la estructura del sistema. Para finalizar indicar que la herramienta de programación utilizada para

la simulación y comprobación del correcto funcionamiento del sistema propuesto, es la versión 7.6 de Matlab.

3.2.1. Modelo del canal RF

El diseño de un sistema localización y posicionamiento en interiores requiere conocer en detalle la propagación por el canal de radio. En los canales de radiopropagación se producen efectos entre la antena transmisora y receptora que hará necesario hacer un análisis del medio (aire) que utilizan.

3.2.1.1. Escenarios de medida

Para la caracterización experimental del canal se han seleccionado entornos típicos para el despliegue de redes inalámbricas, que se pueden encontrar en el Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá. Dentro de estos escenarios se analizan tanto situaciones con línea de visión (LOS) como sin línea de visión (NLOS). A continuación cada uno de estos escenarios en interiores, todos ellos corresponden a la planta 3ª del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá:

Escenario Hall

El primero de los escenarios analizados es el Hall. Dicho escenario es un área abierta, diáfana que presenta pocos obstáculos próximos al transmisor y receptor. Entre los principales obstáculos se pueden destacar las columnas de hormigón, los ascensores con sus puertas metálicas, diversos muros de hormigón y las escaleras de acceso a otros pisos. Se han situado los transmisores en las esquinas del escenario. Las áreas en las que no hay obstáculos son áreas LOS, mientras que las NLOS se sitúan detrás de muros o columnas con lo que habrá problemas de atenuación del rayo directo.

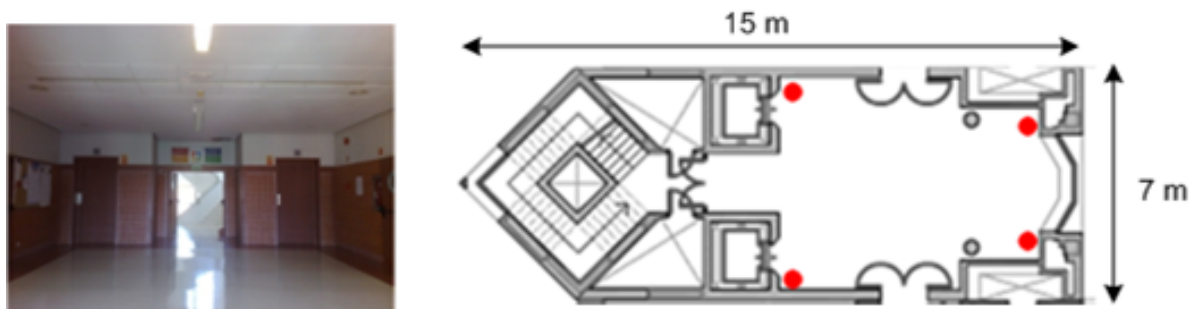


Figura 3.2: Entorno interior abierto, Hall

Escenario Despachos

El segundo de los escenarios de interiores analizado es un típico escenario de despachos. Un pasillo central recorre todos los despachos dividiéndolos en dos zonas cada una de ellas situada

en un lado del pasillo. Es un escenario con mayor número de obstáculos que el anterior, principalmente debido a las paredes aunque también al mobiliario (armarios, ordenadores,...).

Las situaciones LOS o NLOS dependerán de la zona en la que se encuentre el móvil, ya que como se indico en la figura 3.1 no todos los despachos tienen un transmisor.

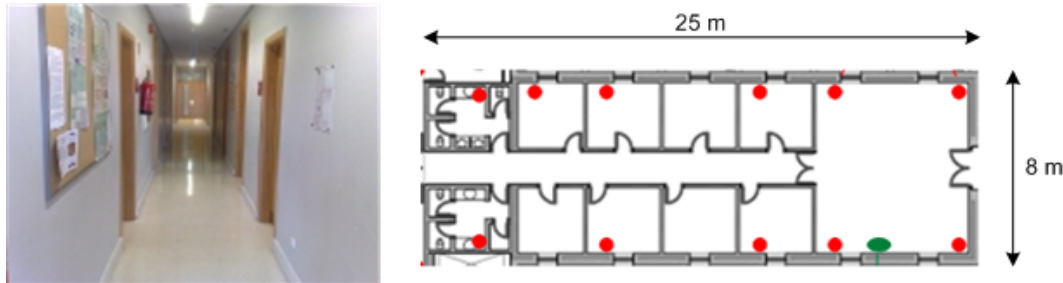


Figura 3.3: Entorno interior con pasillo, despachos y baños

Escenario Laboratorios

Por último, este escenario representa un típico laboratorio con múltiples puestos de trabajo, armarios, mesas, ordenadores, etc. Las situaciones LOS o NLOS dependerán de la posición del móvil ya que se sitúan balizas o nodos de referencia en cada una de las cuatro esquinas del laboratorio.

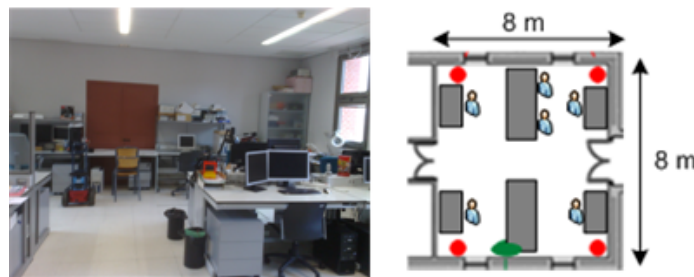


Figura 3.4: Entorno interior, Laboratorio

3.2.1.2. Caracterización del canal

Dentro de la caracterización del canal las distribuciones de probabilidad de Rayleigh y Rice son las distribuciones más utilizadas para modelar los desvanecimientos en áreas locales [Lor01], en esta referencia se realiza un estudio del modelo del canal RF en interiores.

Concepto teórico

En entornos multicamino la señal recibida en sentido amplio puede considerarse como un proceso aleatorio Gaussiano complejo estacionario.

$$y(x) = y_Q(x) + jy_I(x) \quad (3.1)$$

En entornos interiores, $y_Q(x)$ e $y_I(x)$ son variables aleatorias Gaussianas independientes e idénticamente distribuidas de media cero y varianza σ^2 , en función de la distancia r . La envolvente de la señal recibida, $r(x) = |y_I(x)^2 + y_Q(x)^2|^{1/2}$, sigue una distribución de Rayleigh, cuya función de distribución de probabilidad (en función de la distancia r) es:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

mientras que la envolvente al cuadrado, es decir, la potencia instantánea recibida, sigue una distribución exponencial dada por:

$$p(x) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

Si existe un rayo dominante, $y_Q(x)$ e $y_I(x)$ seguirán siendo variables aleatorias Gaussianas pero de media distinta de cero. Si se asume que ambas componentes tienen la misma varianza σ^2 , la distribución del módulo de la envolvente sigue una distribución de Rice:

$$p(x) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{r \cdot v}{\sigma^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (3.4)$$

donde I_0 es la función de Bessel modificada de orden cero, v es la magnitud de la componente dominante y σ^2 es proporcional a la potencia de la componente Rayleigh.

El parametro K de Rice representa la relación entre la potencia asociada al rayo dominante y la potencia del resto de componentes multitrayecto.

$$K = \frac{v^2}{2\sigma^2} \quad (3.5)$$

Si no existe un rayo directo dominante la expresión 3.5 tiende a la función densidad de probabilidad de Rayleigh y, en ese caso, el parametro K 3.5 vale cero [Has93].

La envolvente al cuadrado sigue una distribución chi-square no central con dos grados de libertad [SBM+04]:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-K \frac{x}{2\sigma^2}} I_0\left(2\sqrt{\frac{x \cdot v}{2\sigma^2}}\right) \quad r \geq 0 \quad (3.6)$$

El valor medio de la distribución Rice [Ric45] viene dado por la siguiente expresión:

$$E\{r\} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{K}{2}} [(1+K)I_0(K/2) + KI_1(K/2)] \quad (3.7)$$

y el valor cuadrático medio:

$$E\{r^2\} = v^2 + 2\sigma^2 = 2\sigma^2(K+1) \quad (3.8)$$

Dado un conjunto de muestras de la envolvente de la señal multicamino, el parametro K de la distribución Rice que ajusta dichos datos se obtiene según 3.9 [VKP95]. En [ATK+94] se muestra la validez de 3.9 para estimar el valor de K.

$$\frac{E\{r\}}{\sqrt{E\{r^2\}}} = \sqrt{\frac{\Pi}{4(K+1)}} e^{-K/2} [(K+1)I_0(K/2) + KI_1(K/2)] \quad (3.9)$$

De esta forma, mediante el valor medio y el valor cuadrático medio, estimados a partir de las muestras, puede determinarse el parámetro K de la distribución de Rice que mejor ajusta la estadística de los desvanecimientos. Conocido el valor de K, el parámetro σ puede obtenerse indistintamente de 3.7 ó 3.8.

Aplicación de la teoría a los escenarios posibles

Para esta sección se ha partido del estudio realizado por [Fer07] en un entorno interior similar al de este Trabajo Fin de Grado, formado por espacios abiertos o Hall, despachos y zonas de trabajo o laboratorios.

En este estudio se realizaron un conjunto de medidas con línea de visión directa (LOS) y sin línea de visión directa (NLOS). En la tabla 3.1 se presentan los valores medios de potencia y la estadística de los desvanecimientos representada por el parámetro K de la distribución Rice. Se observa en la tabla 3.1 como, para zonas LOS, el escenario despachos presenta menores valores de potencia media, entorno a -76 dBm, mientras que en los otros dos escenarios, esta potencia media es superior situándose entorno a -60 dBm. Observando la estadística de los desvanecimientos, se observa que el parámetro K de la estadística de Rice es alto, entre 4 y 7 en el escenario Hall, en los otros escenarios el parámetro K es menor, tendiendo a una distribución de tipo Rayleigh.

Escenario	Orientación	LOS		NLOS	
		Pmed	K	Pmed	K
Hall	Espacios abiertos	-59	6	-68	0
	Espacios estrechos	-61	4.5	-67	1.1
Oficinas	Espacios abiertos	-64	2.6	-73	1.4
	Espacios estrechos	-60	2.4	-80	0
Despachos	Espacios abiertos	-77	0.8	-92	1
	Espacios estrechos	-76	4.5	-92	0.7

Tabla 3.1: Potencia media (dBm) y el parámetro K de la estadística de Rice de los desvanecimientos en los distintos escenarios interiores

De este estudio [Fer07] se obtiene que para situaciones NLOS cabe destacar que en el escenario Hall la perdida en potencia respecto a las situaciones LOS es inferior a los otros dos escenarios. Este comportamiento es debido a que, aunque el rayo directo esté obstruido, el resto de componentes multicamino no sufren esa atenuación por obstrucción y contribuyen significativamente a la potencia final. El escenario despachos por su parte presenta una gran pérdida en potencia, en torno a 16 dB, respecto a las situaciones LOS. La estadística de los desvanecimientos en las áreas NLOS presenta un carácter prácticamente tipo Rayleigh, con valores del parámetro K de Rice próximos a 0.

Desde el punto de vista de la estadística de los desvanecimientos y en los niveles medios, ambas orientaciones presentan resultados similares; sin embargo, los niveles instantáneos presentan un comportamiento diferente. Así, la situación *espacios estrechos* presenta desvanecimientos frecuentes y de poca duración, figura 3.5. Este comportamiento es más marcado en los escenarios donde la trayectoria transcurre por pasillos ya que las múltiples reflexiones producidas en las paredes causan una suma constructiva/destructiva muy rápida. Por el contrario, en orientaciones de *espacios abiertos* los desvanecimientos son de mayor duración pero menos frecuentes como se puede ver en la figura 3.5.

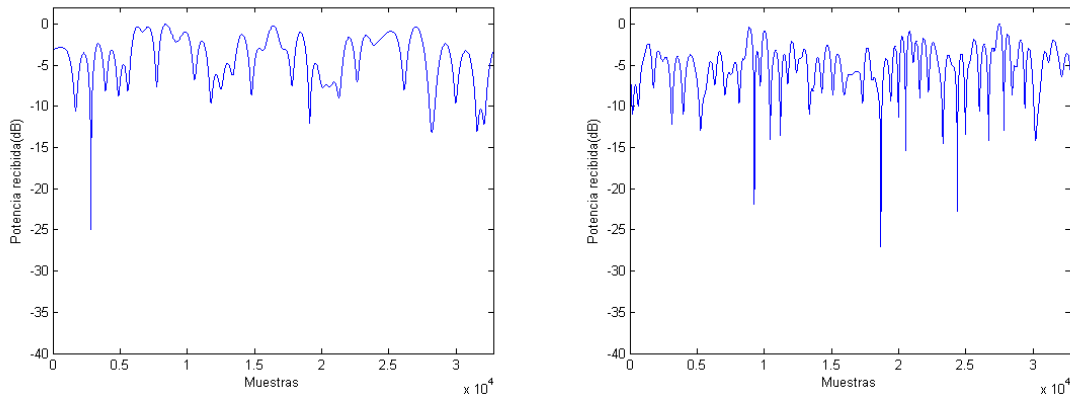


Figura 3.5: Ejemplo de niveles de potencia en LOS para la orientación 'espacios abiertos' (izq) y 'espacios estrechos' (dcha)

Esta dependencia con la orientación es menor en situaciones NLOS donde las direcciones de llegada de las componentes multicamino al receptor son muy variadas y disponen de magnitudes similares.

En definitiva, para modelar el canal RF se hará uso de distribuciones tipo Rayleigh en situaciones NLOS (sin visión entre emisor y receptor) y distribuciones tipo Rice en situaciones LOS (con visión directa entre emisor y receptor).

3.2.2. Atenuación por distancia, paredes y muros

Como se ha visto en el punto anterior, la propagación en interiores considera la reflexión, difracción y dispersión, que para este Trabajo Fin de Grado se representaran mediante distribuciones de tipo Rayleigh o Rice. Otro factor importante es que la propagación en interiores no está influenciada por el perfil del terreno como en ambientes abiertos, pero puede verse afectada por la estructura del edificio, especialmente si hay varios materiales en la construcción del edificio. Por tanto habrá que tener en cuenta las pérdidas de potencia o atenuaciones sufridas por la señal RF con paredes o muros y plantas de los edificios, además de las atenuaciones debidas a la distancia entre el emisor y receptor.

Modelo multipared - Multiwall model

Para aplicar a la señal RF las atenuaciones sufridas, entre el emisor y receptor, por distancia, paredes y/o muros y plantas se ha partido del denominado modelo multipared. Este modelo proporciona la pérdida en espacio libre (LOS) más la pérdida introducida por paredes y obstáculos.

Este modelo está especialmente diseñado para propagación en interiores. Es un modelo empírico para pérdidas en paredes [LF01]. Como se ha mencionado este modelo da una pérdida por el espacio libre en conjunto con la pérdida que se incluye al pasar la señal por diferentes paredes o pisos, al ser penetrados por la señal RF transmitida en la trayectoria directa desde el transmisor hacia el receptor. El modelo multipared está dado por la ecuación 3.10.

$$L = L_o + 10 \cdot n \cdot \log d + \sum K f_i \cdot L f_i + \sum K w_j \cdot L w_j \quad (3.10)$$

En donde se tiene que:

- L_o - constante de pérdidas a 1 metro (valor típico 37 dB).
- n - índice de variación de la potencia con la distancia.
- d - distancia.
- $L f_i$ - pérdidas para piso de tipo i .
- $K f_i$ - número de pisos atravesados de tipo i .
- i - indica el tipo de piso.
- $L w_j$ - pérdidas para paredes de tipo j .
- $K w_j$ - número de paredes atravesadas de tipo j .
- j - indica el tipo de pared.

Este modelo incluye todos los casos posibles ya que en el estudio inicial de este Trabajo Fin de Grado, se pensó en realizar el sistema entre dos plantas del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá. Este primer estudio se desestimó por problemas de complejidad y de tiempo. Por lo que la ecuación anterior queda sensiblemente reducida como se muestra a continuación en 3.11.

$$L = L_o + 10 \cdot n \cdot \log d + \sum K f_i \cdot L f_i \quad (3.11)$$

En espacios interiores sin paredes como puede ser el caso de los laboratorios de trabajo o zonas abiertas, la ecuación 3.10 se reduce a su forma más simple 3.12, solo teniendo en cuenta la distancia directa de separación entre el emisor y receptor de la señal RF.

$$L = L_o + 10 \cdot n \cdot \log d \quad (3.12)$$

3.2.3. Influencia del cuerpo humano en el modelo de enlace ZigBee

Debido a que el móvil (dispositivo RF ZigBee) a localizar es portado por una persona y que el entorno que rodea a dicho dispositivo puede estar habitado por personas, el patrón de emisión y recepción de los dispositivos RF ZigBee puede verse afectado por la atenuación que produce el cuerpo humano en la banda de frecuencias de trabajo de RF ZigBee, 2.4 GHz. Por tanto, será otro factor que se deberá tener en cuenta a la hora de simular el comportamiento de la red RF ZigBee.

Esto es, dependiendo de la orientación de la persona a localizar respecto a las balizas del entorno y de las personas cercanas a ella, la potencia recibida puede variar de forma que el coeficiente de atenuación del medio n deja de ser constante, lo que puede producir errores que se ven atenuados cuanto mayor sea el número de balizas que se utilicen para la localización.

Para este Trabajo Fin de Grado, en este aspecto, se ha partido de los resultados obtenidos en el proyecto [GJB06], en el cual se modela e identifica el efecto del cuerpo humano en la medida de distancias desde diferentes orientaciones (simulando diferentes balizas) en la zona en la que se propone nuestro sistema, el Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá, para ello se realizó un experimento en el que se midió el nivel de potencia entre una baliza fija y una persona portadora de un dispositivo ZigBee, para varias distancias y a su vez para diferentes orientaciones respecto a una baliza.

Las medidas se realizaron para una potencia de transmisión de -1 dBm cada 1.2 m hasta una distancia de 22 m. En cada posición se realizaron medidas para 16 orientaciones distintas, figura 3.6.

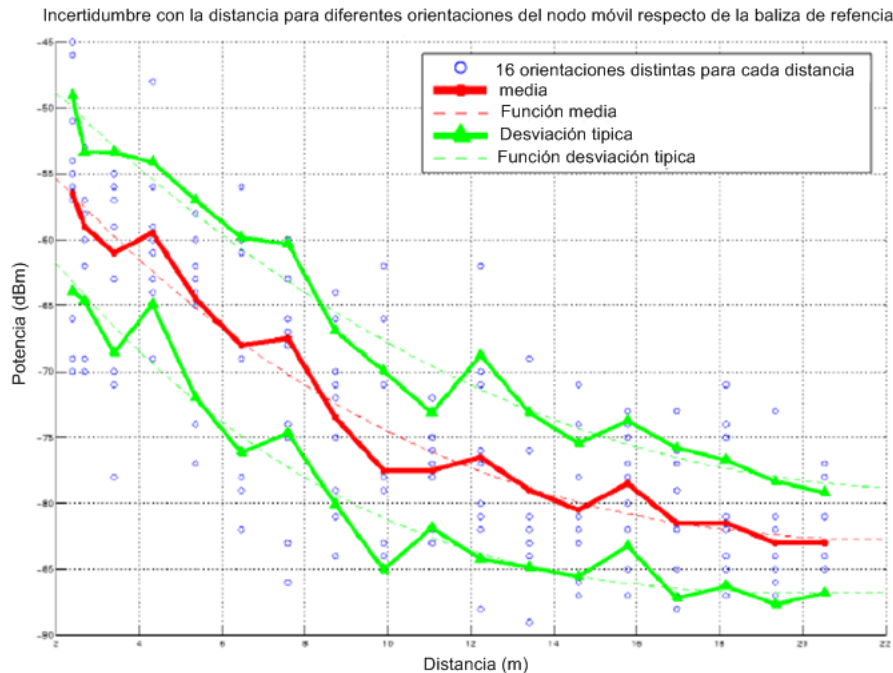


Figura 3.6: Influencia del cuerpo humano en la potencia recibida

A partir de los niveles de potencia obtenidos se realizó la estimación de la distancia, figura 3.7. Se ha realizado un promediado de las muestras obtenidas para cada distancia de forma que se ha ajustado el coeficiente de atenuación del medio a la recta teórica $n = 3,3$.

Analizando los resultados obtenidos en las figuras 3.6 y 3.7, se observa que existe una gran dispersión en potencia y en distancia para las diferentes orientaciones. Así mismo, se puede deducir que las medidas se corresponden con una función densidad de probabilidad gaussiana de desviación típica 5 dB (5 m) y media cercana a cero.

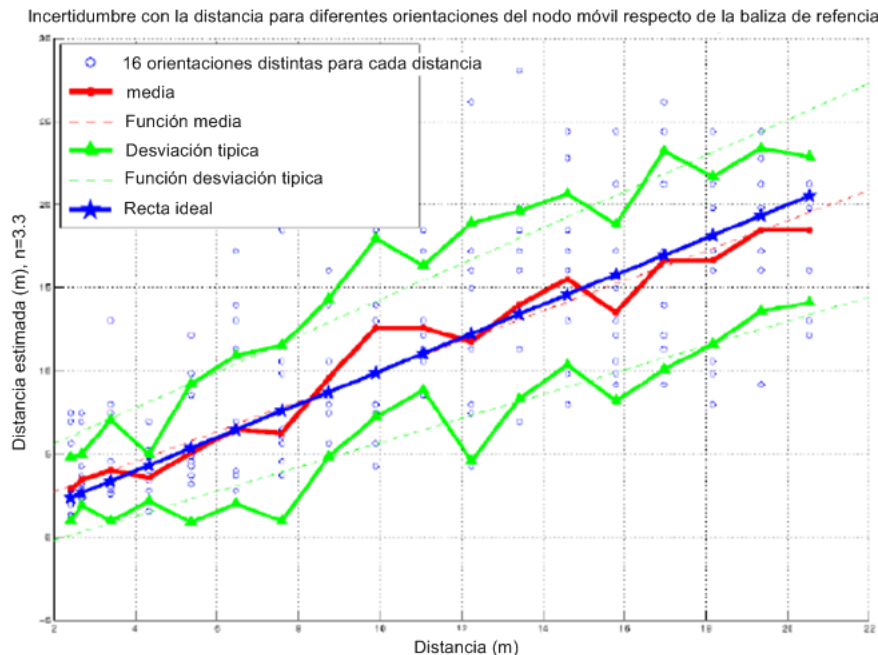


Figura 3.7: Influencia del cuerpo humano en la medida de distancias

3.3. Simulación del sistema RF

Una vez establecidos los elementos que forman el sistema propuesto y ajustado su comportamiento lo máximo posible al comportamiento real, se procede a crear el simulador de red RF ZigBee. A continuación en los siguientes sub-apartados se verán en detalle la creación de los métodos o modelos explicados en el apartado anterior con la herramienta utilizada, como se ha indicado anteriormente la herramienta seleccionada es Matlab.

3.3.1. Visión general del sistema RF

Entre las primeras decisiones en el diseño de todo sistema ILS está la elección del método de localización. A partir del estudio de las diferentes alternativas existentes (capítulo 2), se ha elegido el nivel de potencia RSSI como la mejor opción para este Trabajo. Otra cuestión importante es elegir la tecnología de comunicación inalámbrica a utilizar, se eligió RF ZigBEE. A partir de estas premisas, surge el problema de modelar adecuadamente el comportamiento de una red RF ZigBee de localización en interiores extensos.

En este apartado se detalla el desarrollo con la herramienta Matlab de los métodos y algoritmos para la simulación de una red RF ZigBee. Una vez creados, sus resultados permitirán conocer las características que debe tener la red RF ZigBee real. Este simulador permitirá co-

nocer el número de balizas necesario y su ubicación para obtener un sistema de localización en interiores apropiado para cumplir con las especificaciones dadas con un grado de precisión suficiente. También se explicará en detalle la interfaz de usuario creada. A continuación se muestra un diagrama de bloques del sistema 3.8.

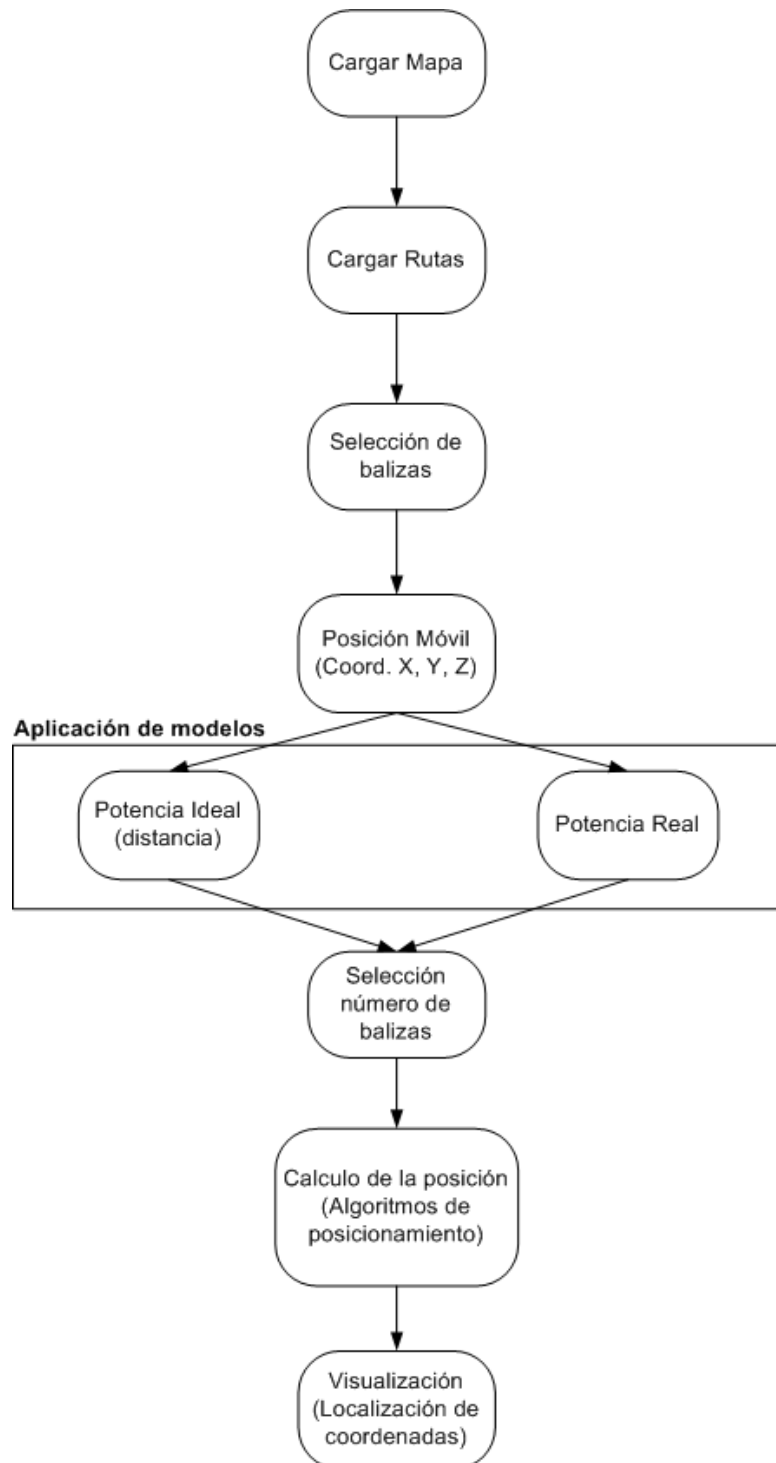


Figura 3.8: Diagrama de bloques del simulador RF ZigBee

Una vez visto el diagrama de bloques del simulador que se desea crear, se muestra el diseño

de la interfaz de usuario de dicho simulador creado con la herramienta Matlab. Antes de explicar ningún apartado del simulador se va a realizar una breve descripción de la función que realiza cada botón. A continuación la figura 3.9 con la visión inicial de la interfaz de usuario del simulador.

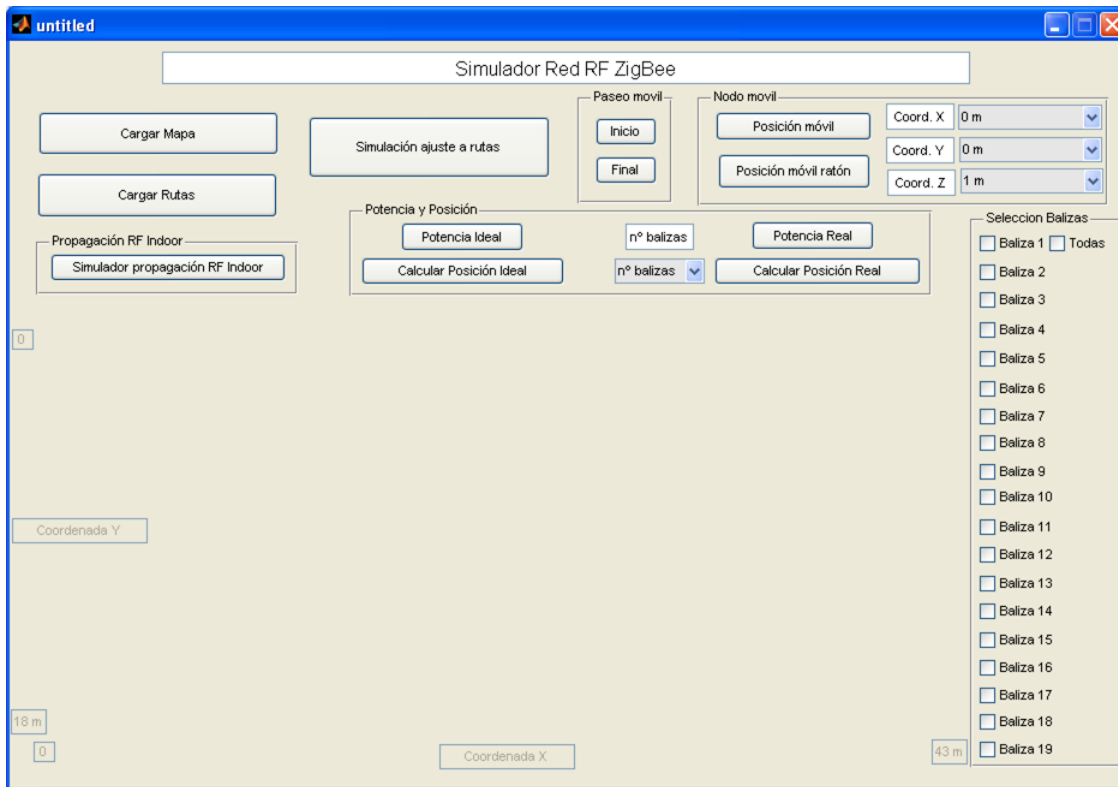


Figura 3.9: Interfaz de usuario del simulador RF ZigBee

- *Cargar Mapa*: selección del mapa a utilizar.
- *Cargar Rutas*: creación del grafo de descripción métrica del mapa, Metric Description Graph (MDG), situación de pasillos, es decir, paso habitual del móvil.
- *Selección de balizas*: permite seleccionar las balizas activas.
- *Posición móvil*: permite posicionar el móvil en las coordenadas (X,Y,Z) deseadas.
- *Posición móvil ratón*: igual que el botón anterior pero realizando el posicionamiento directamente pinchando con el ratón.
- *Potencia Ideal*: calcula la potencia ideal recibida por el móvil de cada una de las balizas activas.
- *Calcular Posición Ideal*: calcula la posición ideal a partir de la potencia ideal recibida y de las coordenadas de las balizas.
- *Potencia Real*: calcula la potencia real recibida por el móvil de cada una de las balizas activas.
- *Calcular Posición Real*: calcula la posición real a partir de la potencia real recibida y de las coordenadas de las balizas.

- *nº balizas*: indica el número de balizas que participan en el cálculo de la posición
- *Paseo móvil*: permite realizar la simulación de varias posiciones del móvil de forma continua.
- *Simulación ajuste a rutas*: ejemplo de ajuste de posiciones estimadas del móvil al grafo de rutas o MDG.
- *Simulador propagación RF Indoor*: ejemplo de propagación de RF en interiores en función del mapa y activando las balizas indicadas.

Lo primero que se debe realizar es cargar un mapa del área o zona en la cual se quiere simular el comportamiento de una red RF ZigBee, en este caso la zona es la tercera planta del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico, Universidad de Alcalá.

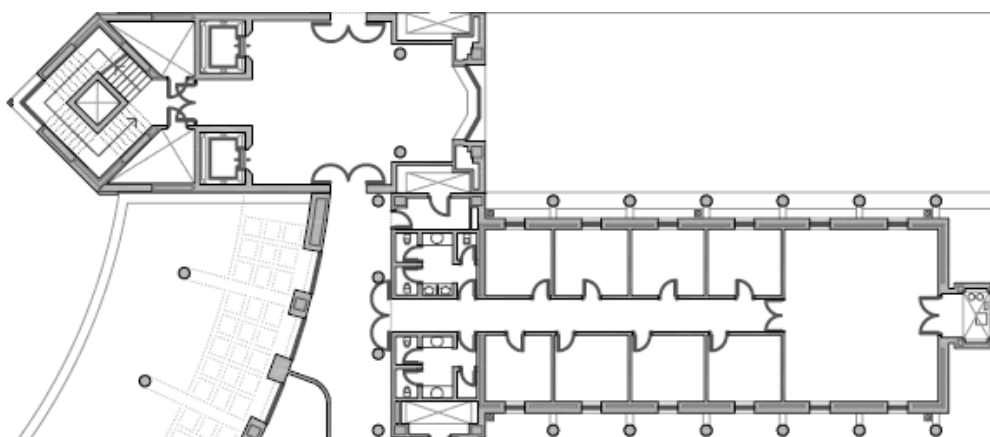


Figura 3.10: Planta 3ª del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico, Universidad de Alcalá

Una vez cargado el mapa de la figura 3.10 de la zona en la que se va a simular el comportamiento de la red RF ZigBee se habilitarán botones para seleccionar otras dos opciones. La primera de ellas la selección de las balizas que se desean activar, se puede seleccionar una a una, o también todas a la vez. La otra opción es el siempre útil grafo de rutas (Metric Description Graph - MDG), explicado en el capítulo 5 de este Trabajo, que permite conocer las zonas por las que discurren los pasillos, es decir, las zonas habituales de paso de una persona o móvil como se puede observar en la figura 3.11. Mediante dicho grafo de rutas se evita el paso imposible a través de paredes o muros, y también se puede evitar el paso a través de armarios o mesas de trabajo.

Realizados los pasos anteriores ahora se está en condiciones de situar el móvil, del cual se desea simular la posición estimada por la red RF ZigBee. La posición del móvil se puede situar mediante la selección de las coordenadas X, Y y Z mediante un cuadro desplegable o mediante el uso del ratón, como se puede apreciar en la figura 3.12.

Situado el móvil, es decir, conocidas sus coordenadas, y seleccionadas las balizas cuyas coordenadas y potencia de emisión son conocidas, el sistema se encuentra capacitado para poder calcular las potencias que recibiría dicho móvil de cada una de las balizas activas; estas potencias dependerán de la distancia, paredes y/o obstáculos, así como del medio o canal RF, todo ello se explicará con detalle en el siguiente apartado. Si cabe decir que se pueden calcular dos tipos de potencia: la potencia ideal, nivel de potencia RSSI ideal, solo influenciada por la distancia; y el

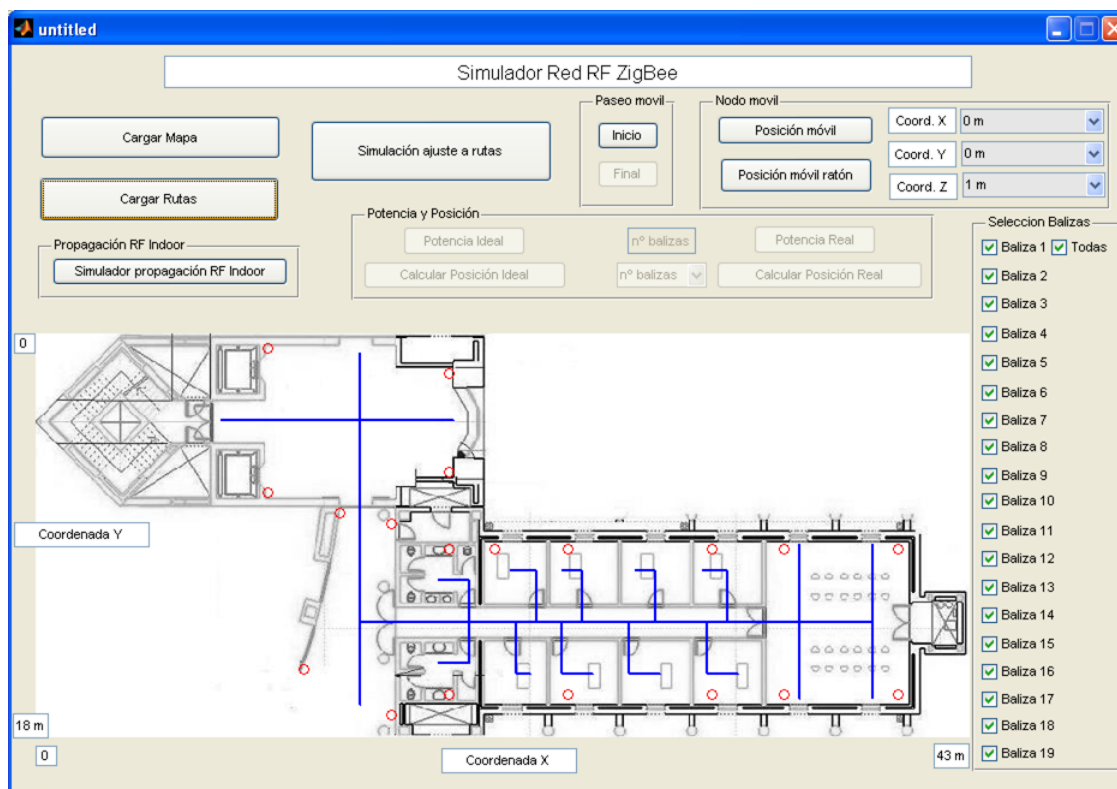


Figura 3.11: Interfaz de usuario - Grafo de rutas y balizas

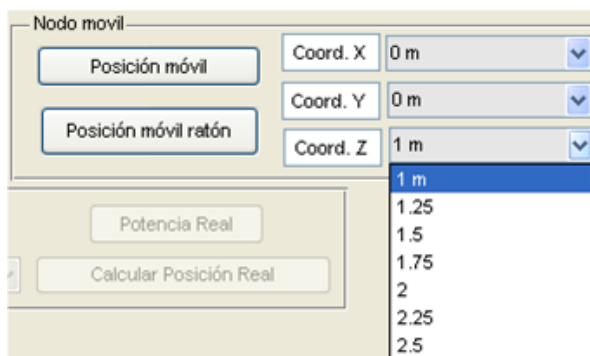


Figura 3.12: Selección de posición del móvil

nivel de potencia RSSI real influenciada por todos los parámetros indicados anteriormente. Una vez conocidos los niveles de potencia RSSI mediante algoritmos específicos de posicionamiento se puede estimar la posición que indicaría la red RF ZigBee simulada. Por lo tanto, mediante esta simulación de una red RF ZigBee en un entorno interior, se podrían llegar a conocer las características y dispositivos necesarios para que la red tuviera una buena precisión al menor coste posible.

3.3.2. Modelado del entorno

En este apartado de modelado del entorno se incluye el modelado y definición de todos aquellos parámetros que influyen en el nivel de potencia RSSI y que se han definido en el apartado anterior. Como se indicó la herramienta software utilizada será Matlab versión 7.6.

3.3.2.1. Desvanecimiento del nivel de potencia RSSI

Como se ha explicado anteriormente para modelar el canal RF se hará uso de distribuciones tipo Rayleigh en situaciones NLOS (sin visión entre emisor y receptor) y distribuciones tipo Rice en situaciones LOS (con visión directa entre emisor y receptor). La herramienta Matlab utilizada para la realización de este simulador permite implementar fácilmente estas dos funciones.

3.3.2.2. Atenuaciones de la señal RF

Para la implementación en el sistema de las atenuaciones indicadas en el apartado anterior por distancia, paredes y/o muros se realiza fácilmente aplicando las formulas y conceptos teóricos mediante la herramienta Matlab. Partiendo de la atenuación por la distancia que es el caso más simple en el cual simplemente hay que aplicar la formula (3.13).

$$L = L_o + 10 \cdot n \cdot \log d \quad (3.13)$$

Para el caso de paredes y/o muros la formula (3.14) se complica por lo que ya es necesario realizar otros pasos, pero también fácilmente implementables con la herramienta Matlab. Simplemente crear un archivo con las coordenadas donde se encuentran los obstáculos y otro archivo con los coeficientes de atenuación de dichos obstáculos.

$$L = L_o + 10 \cdot n \cdot \log d + \sum K f_i \cdot L f_i \quad (3.14)$$

Estos parámetros no son introducidos en el simulador por el usuario, ya que variarán en función de las características del entorno (tipo y grosor de las paredes, etc.).

3.3.3. Simulación de la posición del móvil

Como se ha indicado anteriormente el objetivo de este simulador es estimar una posición del móvil al igual que realizaría una red RF real. Para ello mediante las coordenadas de las balizas de referencia y la potencia recibida de cada una de ellas por parte del nodo móvil se podrá realizar una simulación de suposición. Esta simulación permitirá conocer en un determinado entorno y con el número de balizas seleccionadas si se podría estimar de una forma suficientemente precisa la posición del móvil.

En el caso de la red RF real la posición se suele estimar, a partir de las coordenadas de las balizas de mayor potencia, de las cuales se posee su posición (coordenada X e Y) y el nivel de potencia RSSI que llega de cada una de ellas al nodo móvil.

3.3.3.1. Nivel de potencia real

El modelo de propagación de una onda RF en función de la distancia es:

$$P_r(d) = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (3.15)$$

- P_r : potencia recibida.
- P_t : potencia transmitida.
- G_r : ganancia de recepción.
- G_t : ganancia de transmisión.
- λ : longitud de onda 0.122 m para 2.45 GHz.
- L : factor de perdidas del sistema. $L=1$ si $d > \lambda$.
- d : distancia medida.

Se analizarán los parámetros de la ecuación (3.15). La potencia transmitida es un dato conocido ya que es un dato facilitado por los fabricantes de dispositivos RF ZigBee y que generalmente se puede configurar. La ganancia de transmisión y recepción se consideran parámetros ideales y por ultimo la longitud de onda y el factor de perdidas también se conocen. Los únicos parámetros que quedan son la distancia del móvil a cada una de las balizas la cuál es obtenida por el propio simulador.

Por tanto despejando de la ecuación (3.15) se obtendría fácilmente la potencia recibida por el móvil de cada una de las balizas de referencia activas. Pero esta potencia recibida no sería real ya que aún no se han tenido en cuenta factores como atenuaciones, obstáculos, etc. Por lo que se aplica lo descrito anteriormente en la sección de modelado del entorno y se obtiene una estimación de la potencia recibida real.

Una vez obtenida la potencia recibida real de cada baliza y sus coordenadas reales se podría realizar una estimación (simulación) de la posición del móvil. En el sistema real dicha estimación se realiza con un módulo propio del fabricante de los dispositivos (Texas Instruments) denominado Location Engine, el cual es totalmente privado y cerrado por lo que es imposible realizar su simulación ya que es totalmente desconocido para el usuario. Debido a esto es necesario realizar un algoritmo que permita estimar la posición del móvil.

Tanto el algoritmo de posicionamiento de Texas Instruments, Location Engine (descrito en sección 5.1), como el algoritmo propio desarrollado en este Trabajo Fin de Grado para la estimación de la posición del móvil se explicarán en detalle en la siguiente capítulo.

A continuación en la figura 3.13 se observa la simulación de la estimación de posición del móvil en instantes consecutivos. En ella el móvil permanece en una posición real fija pero las estimaciones varían debido a todos los efectos modelados y explicados en este apartado, es decir, se puede observar como influye en la estimación el medio o canal RF (desvanecimientos, multicamino,...).

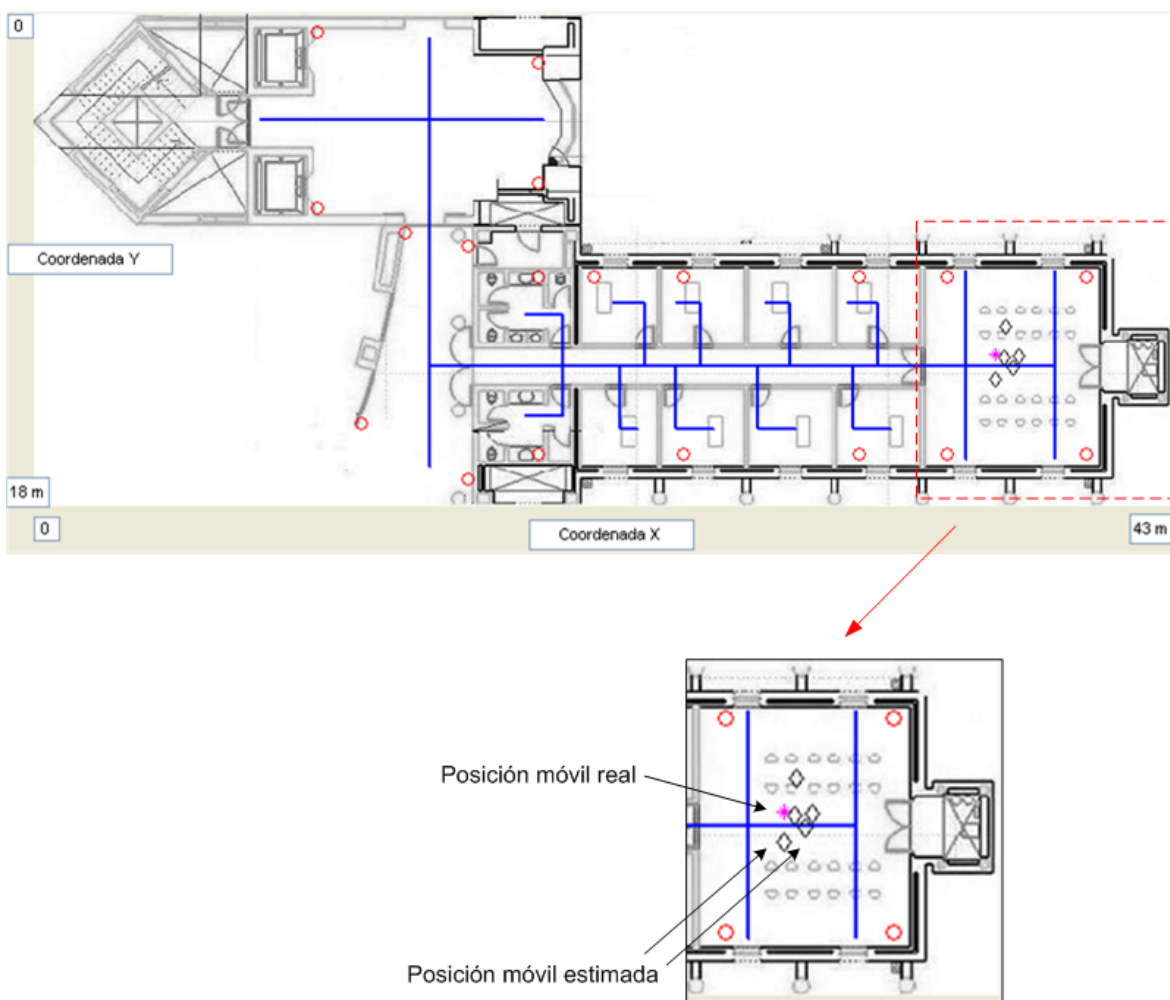


Figura 3.13: Visión del simulador estimando la posición del móvil

Capítulo 4

Red de Localización: Dispositivos Físicos

Hoy en día, ninguna de las soluciones propuestas para la localización en interiores ha conseguido el éxito que ha alcanzado el GPS en los sistemas de localización y navegación análogos desarrollados para exteriores, entre otras razones porque la localización en interiores plantea retos tecnológicos muy superiores a la localización en espacios exteriores.

Como se ha indicado anteriormente el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar un sistema de localización en interiores extensos mediante balizas de radio frecuencia. En concreto se trata de poder localizar a una persona o móvil que se desplace por un entorno interior extenso balizado mediante balizas RF portando únicamente un dispositivo RF móvil, pudiendo visualizar en todo momento su posición en el entorno.

4.1. Introducción

El sistema de posicionamiento que se ha desarrollado está formado por una red de nodos fijos, de coordenadas de posición conocidas, que dirigen la información hacia un nodo coordinador que se encarga de recoger todos los datos. Las personas o móviles que hacen uso del sistema de localización llevan consigo un nodo móvil, es decir, su posición no es fija, el cual se comunica con la red.

Basándose en el hecho de que la intensidad de la señal RSSI decae con la distancia entre otros muchos factores, el nodo móvil, calcula o estima su posición basándose en el nivel de potencia RSSI que recibe de las balizas de referencia y las coordenadas de posición de las mismas.

Tras calcular su posición, el nodo móvil la envía hasta el nodo coordinador que está conectado a un PC, haciendo uso de la red de nodos fijos o balizas de referencia para rutear los datos hasta el coordinador y de ahí al PC de gestión del sistema.

En este capítulo se explicarán las características del protocolo de comunicación inalámbrica RF ZigBee, los dispositivos físicos utilizados y por último se explicará la comunicación entre los distintos dispositivos físicos mediante el protocolo ZigBee.

4.2. Protocolo de comunicación inalámbrica - ZigBee

Dentro de las tecnologías de comunicación inalámbrica con radio frecuencia, ZigBee posee interesantes características que la diferencian del resto. ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas especificado y sostenido por la ZigBee Alliance (fabricantes como Philips, Motorola,...).

Actualmente existen una gran cantidad de estándares para las comunicaciones inalámbricas. Algunos de ellos permiten grandes tasas de transferencia de datos para aplicaciones tales como la transmisión de audio, vídeo, datos, etc. Sin embargo, estos estándares no son adecuados para situaciones en las que el consumo energético o la complejidad del dispositivo son factores críticos en el sistema. Para plantear una solución efectiva en términos de gestión energética en aplicaciones de baja tasa de transferencia de datos, se ha diseñado ZigBee. Tanto los sensores como los actuadores u otros dispositivos pequeños de medida o control no requieren un gran ancho de banda, pero si un mínimo consumo energético y una baja latencia. ZigBee es idóneo para la comunicación de estos dispositivos.

Se define ZigBee como una pila de protocolos que permite la comunicación de forma sencilla entre múltiples dispositivos y se especifica en diversas capas. Las capas básicas, física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) están definidas por el estándar IEEE 802.15.4, LR-WPAN (Low Rate - Wireless Personal Area Network). Este estándar fue diseñado pensando en la sencillez de la implementación y el bajo consumo, sin perder potencia ni prestaciones.

El estándar ZigBee amplía el estándar IEEE 802.15.4 aportando una capa de red (NWK) que gestiona las tareas de enrutado y de mantenimiento de los nodos de la red y un entorno de aplicación que proporciona una subcapa de aplicación (APS) que establece una interfaz para la capa de red, y los objetos de los dispositivos tanto de ZigBee como del diseñador.

Por lo tanto, los estándares IEEE 802.15.4 y ZigBee se complementan proporcionando una pila completa de protocolos que permiten las comunicaciones entre multitud de dispositivos de una forma simple y eficiente.

4.2.1. Características significativas de IEEE 802.15.4/ZigBee

IEEE 802.15.4

- *Banda de trabajo:* 2.4 GHz (16 canales), 915 MHz (10 canales), 868 MHz (1 canal).
- *Tasas de transferencia:* 250 Kb/s, 40 Kb/s, 20 Kb/s.
- *Topologías:* estrella y P2P (punto a punto).
- *Direccionamiento:* MAC recortado (16 bits) y extendido (64 bits).
- *Métodos de acceso al canal:* CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).
- *Soporta redes slotted (QoS) y non-slotted.*

- *Bajo consumo energético.*
- *Gran densidad de nodos por red.*
- *Radio de alcance: 10 m - 75 m.*

ZigBee

- *Direccionamiento a nivel de red (16 bits).*
- *Soporte para enrutamiento de paquetes.*
- *Topologías:* malla, debido a la posibilidad de enrutamiento.
- *Dispositivos:* FFD (coordinador, router y dispositivo final) y RFD (dispositivo final). FFD y RFD explicado en sección 4.2.3.
- *Redes autogestionables, mantenimiento reducido.*

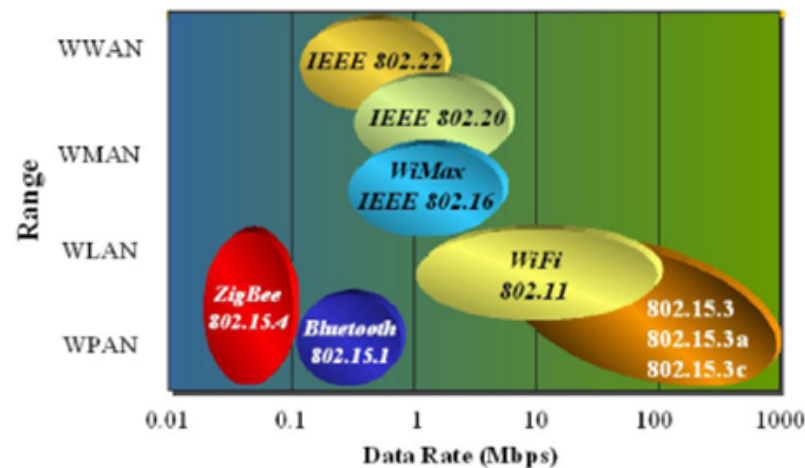


Figura 4.1: Protocolos de comunicación inalámbrica. Imagen extraída de [TI11]

4.2.2. Requisitos Hardware

ZigBee es un protocolo estándar que requiere una implementación para poder funcionar. Esta puede hacerse por software en multitud de arquitecturas. Sin embargo, independientemente de donde se implemente, necesita unos recursos mínimos. Ya que los dispositivos pueden efectuar diversos cometidos, los requisitos también varían de unos a otros.

Los requerimientos mínimos suelen ser:

- *Microcontrolador de 8 bits.*
- *Pila completa, menor de 32 KB.*
- *Pila sencilla, 6 KB.*

En cuanto a la memoria RAM, cada implementación necesita una cantidad diferente, en función del grado de optimización de la misma, pero es de interés mencionar que los coordinadores y/o routers tendrán más exigencias puesto que necesitan mantener tablas para los dispositivos de la red, datos de enlazado, etc.

4.2.3. Topologías de red y dispositivos

El estándar de la IEEE especifica dos tipos de dispositivos: de función reducida (RFD, Reduced Function Device) y de función completa (FFD, Full Function Device), diseñados para propósitos distintos.

El RFD está pensado para aplicaciones muy sencillas, como interruptores de iluminación y sensores infrarrojos, que no necesitan enviar o recibir grandes cantidades de información. Solo puede comunicarse con dispositivos FFD. Todo esto permite que pueda ser implementado usando los mínimos recursos posibles, así como un ahorro energético considerable. En cambio, los FFD pueden actuar como coordinadores o como dispositivos finales. Pueden comunicarse con otros FFD y RFD. Para ello necesitan más recursos, han de implementar la pila completa y presentan en consecuencia consumos energéticos más elevados.

ZigBee aprovecha esta diferenciación. Además del coordinador de la red, es posible la existencia de routers, que han de ser FFD, que aumentan las posibles topologías de red pudiendo crear no solo redes en estrella (star) y P2P sino también redes en malla (mesh) y redes en árbol (tree).

Para poder tener una red, son necesarios como mínimo dos elementos: un coordinador (FFD) que creará la red, le asignará el NWKID (NetWork Identifier), y poseerá los mecanismos necesarios para la incorporación y eliminación de nodos en la red; y además es necesario, como mínimo, un nodo, que puede ser FFD o RFD, con el que comunicarse.

La topología en estrella consiste en un coordinador y una serie de nodos RFD o FFD que sólo se comunican con el coordinador. En la topología P2P, dos nodos solo pueden comunicarse entre sí directamente y, por tanto, sólo pueden hacerlo si están en el radio de alcance mutuo. Esta topología permite a ZigBee crear otras más complejas, como redes en malla, siempre y cuando sea posible el enrutado de los datos de un nodo a otro.

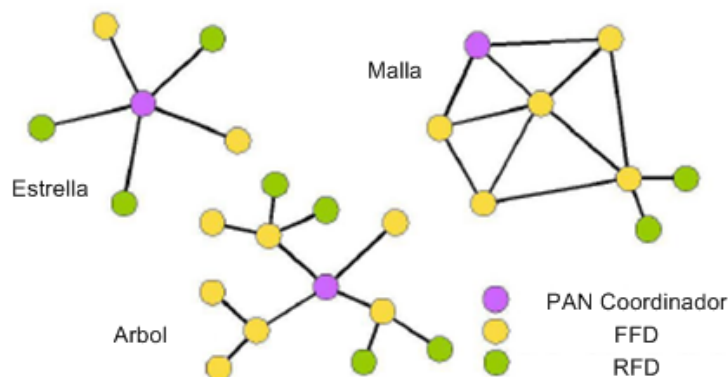


Figura 4.2: Topologías de red RF ZigBee. Imagen extraída de [TI11]

4.2.4. Comunicaciones

Como se indicó anteriormente, ZigBee está construido sobre el estándar IEEE 802.15.4 que define el hardware y el software. Éste describe, siguiendo el modelo de referencia OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos), las capas físicas (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC). La ZigBee Alliance ha añadido las especificaciones de las capas de red (NWK), seguridad (SEC) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee. En la figura 4.3 se puede observar dicha arquitectura de la pila de comunicaciones ZigBee.

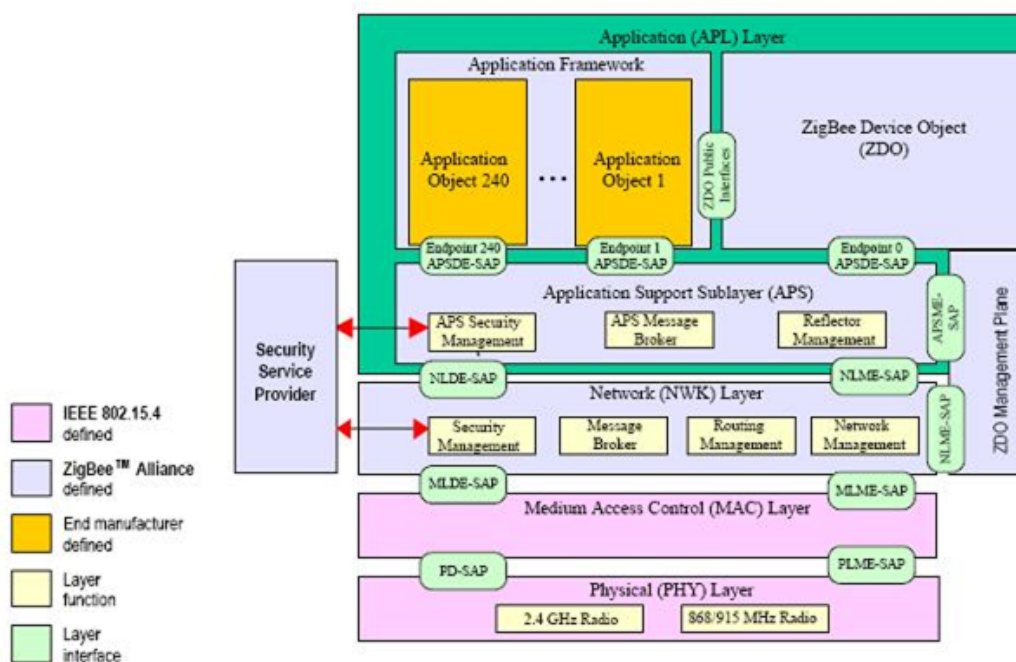


Figura 4.3: Arquitectura de la pila de comunicaciones ZigBee. Imagen extraída de [TI11]

Las capas MAC y PHY están implementadas de forma hardware sobre el silicio del chip y las capas NWK, SEC y APL están implementadas en forma de librería de funciones software que el fabricante provee para facilitar el desarrollo.

4.2.4.1. Capa Física (PHY)

Es la responsable de la transmisión y la recepción de datos en un canal de radio dado mediante técnicas de modulación de espectro expandido (*spreading*). La norma IEEE 802.15.4 ofrece tres bandas de frecuencia en las cuales operar (figura 4.4).

- *Banda de 2.4 GHz*: (Industrial, Médica y Científica), de uso global, 16 canales disponibles.
- *Banda de 915 MHz*: 10 canales con uso sólo en América.
- *Banda de 868 MHz*: un único canal y de uso europeo.

Dadas las limitaciones de la banda de 868 MHz. En Europa es dominante la banda de 2.4 GHz. En esta banda se definen hasta 16 canales cada uno de ellos con un ancho de banda de 5 MHz. Se utiliza una emisión de radio con una dispersión de espectro mediante secuencia directa,

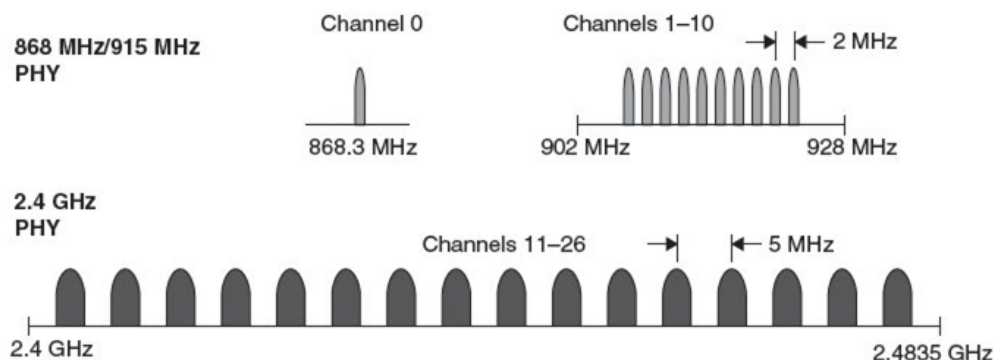


Figura 4.4: Canales IEEE 802.14.4 (ZigBee)

lográndose tasas de transmisión de hasta 250 Kbps y con distancias que oscilan entre los 10 y 75 m, dependiendo notablemente del entorno de propagación.

Entre las principales funcionalidades de la capa física están: la detección de energía del receptor (ED), indicador de calidad del enlace (LQI) y la evaluación del estado del canal (CCA), activación y desactivación del transceiver, y la transmisión y recepción de datos.

4.2.4.2. Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Esta capa pertenece a la capa de enlace de datos, se encarga del control de acceso al medio y es responsable de transmitir los paquetes. También realiza las labores de validar las tramas que recibe, comprueba errores en la transmisión y confirma la recepción de tramas al emisor. Así mismo, se encarga de la fragmentación de paquetes, control de flujo y tasa de transmisión. En resumen, se encarga de controlar el medio de comunicación compartido por una serie de dispositivos que se comunican a través de él. Esta capa, junto con la capa física, proporciona los servicios de transmisión inalámbrica punto a punto.

4.2.4.3. Capa de Red (NTW)

Tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada con la capa de aplicación. En esta capa se ubican los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enviar paquetes dirigidos a otros nodos, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos.

Además, la capa de red del controlador es responsable de crear una red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma rama. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y malla), figura 4.2.

4.2.4.4. Capa de Seguridad (SEC)

Dicha capa provee servicios de encriptación utilizando claves de 128 bits para una transmisión de datos segura. Permite diferentes niveles de seguridad dependiendo de las necesidades de la

aplicación. Soporta el uso de claves preinstaladas (fijadas en el proceso de desarrollo) y de claves transportadas (generadas en tiempo real en el momento de la conexión entre dispositivos).

4.2.4.5. Capa de Aplicación (PHY)

La capa de aplicación consta de dos subcapas:

Soporte de Aplicación (APS)

Es la responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red.

Entorno de Aplicación (AF)

Esta subcapa se divide nuevamente en objetos para dispositivos ZigBee (ZDO), que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red (coordinador, móvil o baliza de referencia), y los objetos definidos por el diseñador.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interfaz de datos y otra de control; las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos: módulo de seguridad, que provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que es el encargado de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

4.2.5. Encaminamiento (routing)

La capa MAC ofrece un identificador único de 64 bits para el direccionamiento, y la capa de red otro de 16 bits. Ello implica que se pueden tener una gran cantidad de nodos en una misma red, aunque si un cierto nodo sólo fuese capaz de comunicarse con aquellos que tiene en su radio de alcance, la red estaría muy limitada. Para ello, existen las técnicas de encaminamiento o enrutado. Se crean dispositivos que reenvían aquellos mensajes que no van dirigidos a sí mismos. Por tanto, cualquier nodo de la red puede comunicarse con cualquier otro nodo.

Los routers son dispositivos de propósito específico y han de poseer toda la funcionalidad (FFD). No pueden entrar en modo *ahorro de energía* como los RFD, ya que deben ser capaces de retransmitir los mensajes lo antes posible, por ello, han de escuchar el tráfico constantemente. Deben de mantener tablas con las rutas descubiertas y funcionalidad para participar o iniciar el descubrimiento de nuevas o incluso mejores rutas. También han de ser capaces de detectar y corregir errores. Las tablas contienen información sobre el coste de cada ruta. El coste determina cuál es la mejor ruta en cada momento. La función que elige el coste de una ruta se determina a la hora de crear la implementación de la pila y se puede basar en la latencia del recorrido de los mensajes, aunque es recomendable que se tenga en cuenta la carga media de la batería de los dispositivos que participan en la ruta.

En las tablas de enrutado pueden aparecer direcciones de cualquier dispositivo, pero solo los routers pueden participar en los métodos de enrutado. Si un mensaje llega a un dispositivo FFD que no es un router, comprueba la dirección de destino, y solo lo reenvía si pertenece a alguno de los RFD que están asociados a él. Si es para él, lo pasa a la capa superior, en otro caso se descarta.

4.2.6. Perfiles

Ya que ZigBee está pensado para la comunicación entre diversos dispositivos, posiblemente de fabricantes distintos, es necesario un mecanismo para hacer compatibles los mensajes, comandos, etc. que pueden enviarse entre ellos. Para este fin se crearon los perfiles de ZigBee.

Los perfiles son clave para la comunicación entre dispositivos ZigBee. Definen los métodos de comunicación, el tipo de mensajes a utilizar, los comandos disponibles y las respuestas, etc. que permiten a dispositivos separados comunicarse para crear una aplicación distribuida. Casi todo tipo de operaciones han de estar definidas en un perfil. Por ejemplo, las tareas típicas de unirse a una red o descubrir dispositivos y servicios están soportadas por el *perfil de dispositivos* ZigBee.

Cada perfil debe tener un identificador y, obviamente, este ha de ser único. Por ello, la ZigBee Alliance se reserva el derecho de asignar identificadores a los diversos perfiles. Si es necesaria la creación de un nuevo perfil, ha de hacerse la petición a la ZigBee Alliance.

Cada perfil contiene las descripciones de los dispositivos que incluye, los identificadores de cada cluster (y en su caso, sus atributos) y los tipos de servicio ofrecidos. Las descripciones de los dispositivos están definidas por un valor de 16 bits, es decir, 65536 posibles descripciones. Los identificadores de cluster son de 8 bits, 256 posibles cluster. A su vez, si el tipo de servicio ofrecido es orientado a pares clave-valor, cada cluster puede contener atributos por valor de 16 bits o 65536 atributos por cluster. Existen muchas posibilidades dentro de un mismo perfil, y es labor del diseñador del perfil adecuar las necesidades para crear descriptores sencillos y permitir un proceso de mensajes eficiente.

Ya que cada dispositivo puede soportar más de un perfil, y cada perfil puede poseer varios clusters y múltiples descriptores, es necesaria una jerarquía de direccionamiento para acceder a los elementos del dispositivo. En primer lugar, se hace referencia al dispositivo entero usando sus direcciones IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización) y NWK. Por otro lado, se definen los Endpoints, que son campos de 8 bits que apuntan a cada una de las diferentes aplicaciones que están soportadas por un dispositivo. Por ejemplo, el 0x00 hace referencia al endpoint del perfil de dispositivo, y el 0xFF hace referencia a todos los endpoints activos (endpoint broadcasting). Ya que los endpoints 0xF1–0xFE están reservados, es posible tener un total de 240 aplicaciones en los endpoints 0x01–0xF0.

Una vez establecidos los endpoints para las aplicaciones, se han de definir los descriptores. Como mínimo, el descriptor *simple* ha de estar presente y disponible para las tareas de descubrimiento de servicio. Existen otros tipos de descriptores que contienen información acerca de la aplicación, del servicio, etc. Pueden contener información sobre el endpoint al que hacen referencia, el perfil o la versión, pero también sobre el tipo de alimentación del dispositivo, el

nivel de la batería, el fabricante, número de serie y hasta un icono o la dirección de este para representar el nodo en PCs, PDAs, etc.

4.3. Estructura del sistema localización

Para implementar el sistema de localización se hace uso de tres tipos de dispositivos RF o nodos:

- *Nodo coordinador.*
- *Nodo móvil.*
- *Nodo fijo o balizas de referencia.*

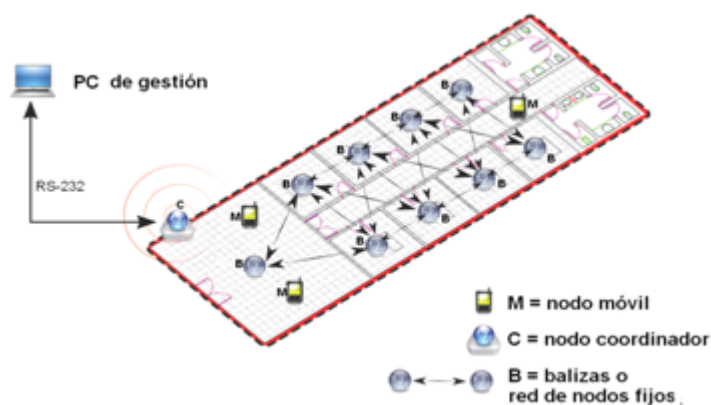


Figura 4.5: Esquema del sistema de localización

Para implementar los nodos se han utilizado los microcontroladores CC2430 (nodos fijos y coordinador) y CC2431 (nodo móvil) de Texas Instruments. A continuación se indicarán las características más destacadas de estos dos microcontroladores.

4.3.1. Microcontroladores CC243x

El dispositivo *CC243x* tiene incorporado el módulo ZigBee y el microcontrolador basado en el micro 8051 en el mismo dispositivo, lo que facilita su programación y permite un fácil manejo del mismo. A continuación se detalla cada uno de ellos.

4.3.1.1. CC2430

Este microcontrolador es el utilizado para formar el nodo coordinador y las balizas (nodos fijos). Sus características son las siguientes:

- Integra un transceiver RF (radio frecuencia) compatible con la especificación ZigBee (2.4 GHz especificación IEEE 802.15.4) de alta sensibilidad.

- Bajo consumo en la comunicación por radiofrecuencia (RX: 27 mA, TX:27 mA, con el microcontrolador funcionando a 32 MHz).
- $0,5\mu A$ de consumo en modo powerdown, en el que el dispositivo espera dormido ha ser despertado por una interrupción externa o por el reloj.
- $0,3\mu A$ de consumo en modo stand-by, en el que solo puede ser despertado por interrupciones externas.
- Transición muy rápida de modo bajo consumo a modo activo.
- Amplio rango de voltaje de funcionamiento (2V - 3.6V).
- Microcontrolador basado en un núcleo 8051 mejorado (32 MIPS) de 128K de memoria de programa y 8K de memoria RAM.
- Un IEEE 802.15.4 MAC Timer, un timer general de 16-bit y dos timers de 8-bit.
- De entre los periféricos que incluyen destacan: monitor de temperatura y batería, regulador integrado, medida de RSSI y LQI de las tramas ZigBee.
- ADC de 12-bit con hasta ocho entradas y resolución configurable.
- Dos USARTs con soporte para varios protocolos en serie.
- 21 pin I/O de proposito general.
- Numerosas herramientas de desarrollo.

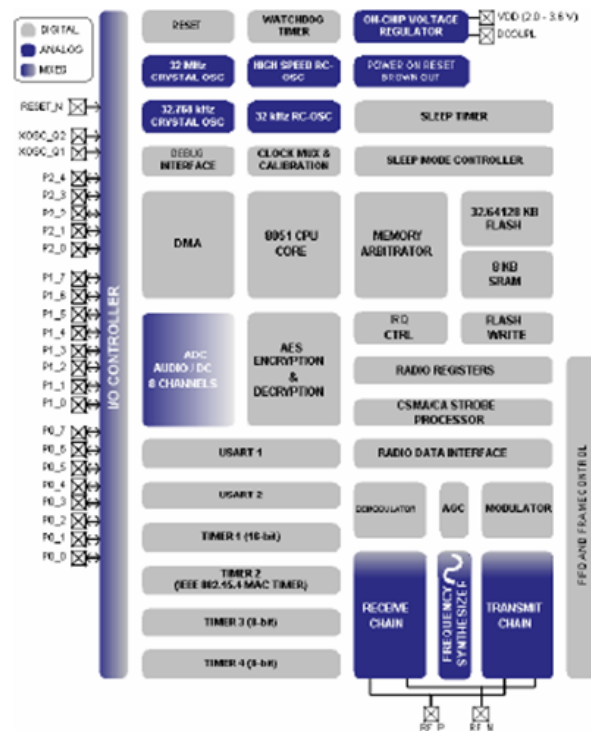


Figura 4.6: Periféricos CC2430. Imagen extraída de [TI11]

4.3.1.2. CC2431

Además de los elementos del CC2430, este chip incluye un periférico más, el motor de localización TI/Chipcon (Location Engine), que implementa de forma hardware un algoritmo de posicionamiento, descrito en la sección 5.1.

Éste, utiliza la potencia de la señal (RSSI) entre el nodo móvil y el nodo de referencia y sus coordenadas para determinar su posición, utilizando los datos entre 3 y 16 balizas de referencia.

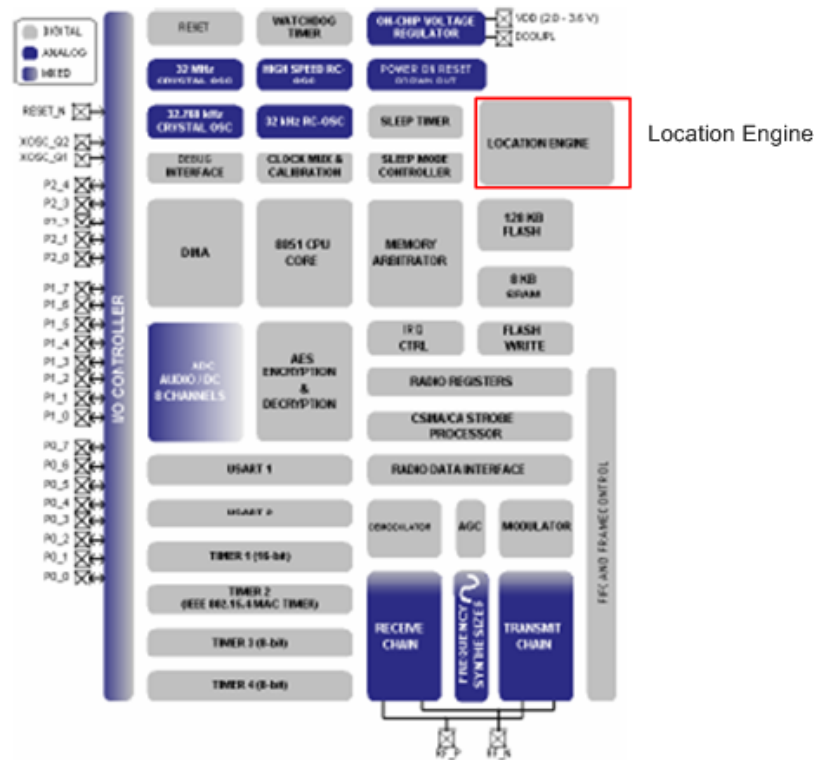


Figura 4.7: Periféricos CC2431 incluyendo Location Engine. Imagen extraída de [TI11]

4.3.2. Plataforma de desarrollo: elementos hardware

Para desarrollar el sistema de localización propuesto, se han utilizado los kit de desarrollo CC2431 development kit TI/Chipcon”que incluyen cada uno, figura reffig:contenidoCC2430DK:

- 2 placas de alimentación SmartRF04EB.
- 10 placas de alimentación Battery Board.
- 2 módulos CC2430EM.
- 10 módulos CC2431EM.
- 12 antenas omnidireccionales.
- 2 cables USB.

- 1 cable serie RS232.
- 1 cable paralelo.

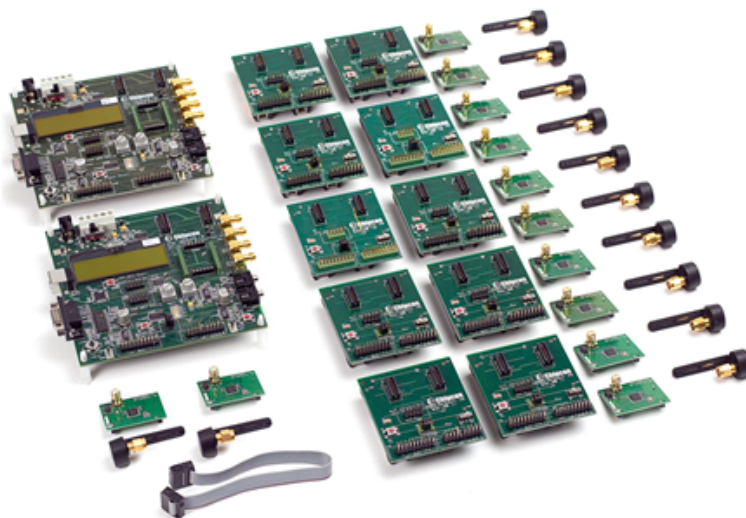


Figura 4.8: Contenido del kit CC2430 DK. Imagen extraída de [TI11]

En concreto en el sistema propuesto, como se puede observar en la figura 3.1 de la sección 3.1: se utilizan un total de 19 balizas o nodos de referencia (desplegadas por los despachos, laboratorios y pasillos), cada una con su correspondiente placa, módulo CC2430 y su antena; un coordinador (situado en el laboratorio) en una placa SmartRF04EB; y un nodo móvil con una placa de alimentación Battery Board.

4.3.2.1. Módulos CC243x-EM

Los módulos de evaluación están formados por el chip CC243x y por toda la electrónica y el hardware necesarios para su correcto funcionamiento. Como puede observarse en la figura 4.9, sólo es necesaria una antena y unos pocos elementos pasivos (acoplo RF y reloj), aparte de la fuente de energía (pila, etc.), para disponer de un nodo ZigBee plenamente funcional.



Figura 4.9: Módulo CC243x EM. Imagen extraída de [TI11]

4.3.2.2. SOC BB. BATTERY BOARD

La función principal de esta placa es la de alimentar con dos pilas tipo AA los módulos CC243x EM.

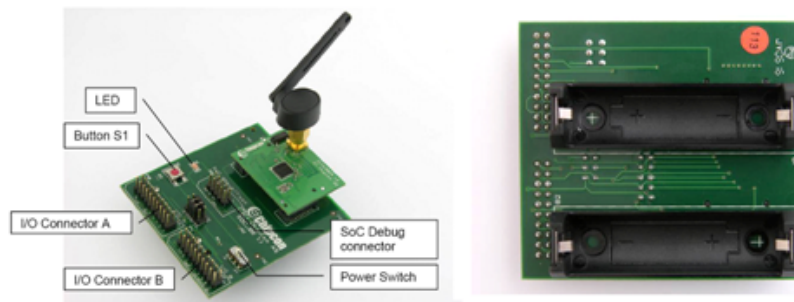


Figura 4.10: SocBB Battery Board

Los conectores A y B de Entrada/Salida de la figura 4.10 dan total acceso sobre los pines del módulo de evaluación. Un elemento a destacar es el puerto Soc Debug, que permite la descarga y depuración del firmware en la memoria flash del chip.

Pin	Function	Pin	Function
1	NC	1	NC
2	NC	2	NC
3	P0_0/MIC_IN	3	VDD
4	VDD	4	P2_0/LED4
5	VDD	5	P1_0/LED1
6	NC	6	P2_1/GD
7	P0_1/BUTTON_PUSH	7	P1_1/PWM_OUTPUT
8	NC	8	P2_2/GD
9	P0_2/UART_RD	9	P1_2/LED2
10	NC	10	P2_3/SDA
11	P0_3/UART_TD	11	P1_3/LED3
12	NC	12	P2_4/SCL
13	P0_4/RTS	13	P1_4/CSn
14	NC	14	NC
15	P0_5/JOY_PUSH	15	P1_5/SCLK
16	NC	16	RESET_N
17	P0_6/JOY	17	P1_6/MOSI
18	NC	18	Debug Data Direction(CC_DR)
19	P0_7/POT	19	P1_7/MISO
20	GND	20	GND

Figura 4.11: Puertos entrada/salida A y B del SocBB. Imagen extraída de [TI11]

4.3.2.3. SMARTRF04EB

En la figura 4.12 se muestran los componentes principales de la tarjeta de desarrollo SmartRF04EB.

Al igual que la placa SocBB, este dispositivo alimenta el módulo CC243x EM que se conecte a él, mediante batería o mediante la conexión de un cable USB.

Los conectores A y B de Entrada/Salida dan total acceso sobre los pines del módulo de evaluación, y son exactamente iguales que en la placa SocBB.

En esta tarjeta, hay que destacar para la aplicación que se ha desarrollado, que cuenta con un puerto serie RS-232 ya que la comunicación entre el PC y la red de nodos será a través de este puerto, por tanto, para el nodo coordinador es necesario utilizar la tarjeta SmartRF04EB, figura 4.12. El resto de nodos pueden ser montados sobre placas SocBB.

También hay que destacar la existencia del puerto USB que además de poder alimentar la tarjeta, permite descargar el firmware en el módulo y hacer la depuración en tiempo real. Esto es

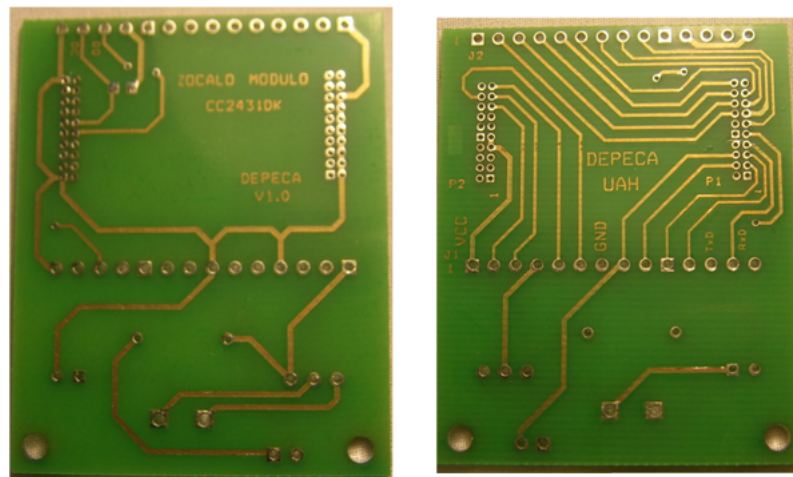


Figura 4.13: Placa diseñada para nodo de referencia

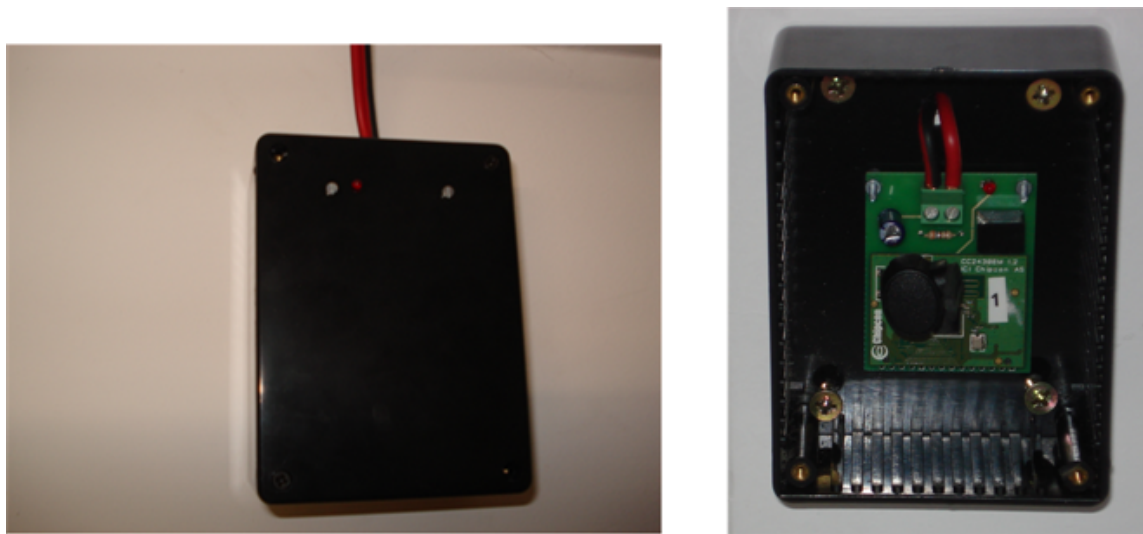


Figura 4.14: Caja con placa diseñada para nodo de referencia

paredes del recinto. Dicha caja protege el módulo y permite ver el led que indica si la baliza está o no activa, es decir, conectada o no a la red de localización de la que forma parte.

4.3.3. Comunicación entre el PC y la red ZigBee

La comunicación entre el PC y la red ZigBee se realiza a través del puerto serie del PC. Partiendo del desarrollo realizado en [Gar10], se ha utilizado el hyperterminal para enviar las órdenes que se deseen al nodo coordinador, y del nodo coordinador a cualquiera de los elementos o dispositivos que forman el resto de la red ZigBee. Igualmente, cualquier dispositivo puede comunicarse con el usuario que éste utilizando el PC a través del coordinador.

Para realizar la comunicación entre el coordinador, los nodos de referencia y el nodo móvil, se ha desarrollado un sistema de mensajes para el puerto serie, utilizando las direcciones IEEE que cada módulo tiene grabado en su memoria no volátil. Esta dirección identifica a cada dispositivo de la red ZigBee.

Se distinguen cuatro tipos de mensajes del puerto serie:

- Mensajes enviados desde el coordinador a un nodo móvil.
- Mensajes recibidos en el coordinador desde un nodo móvil.
- Mensajes enviados desde el coordinador a un nodo de referencia (baliza).
- Mensajes recibidos en el coordinador desde un nodo de referencia.

Los mensajes están constituidos por una cadena de caracteres ASCII del repertorio representable (7 bits, códigos de carácter menores a 128, excluidos los más bajos o de control). De esta forma los mensajes capturados son observables tanto en pantalla como en ficheros de texto .txt.

1	16	16	0-60	1	1	1
@	Dirección IEEE origen	Dirección IEEE destino	Datos	\$	CR	LF

Tabla 4.1: Formato de mensajes del puerto serie

Estos mensajes enviados y recibidos por el puerto serie, permiten darle las ordenes al coordinador para que gestione la red ZigBee y conocer el estado de ésta con los mensajes que llegan desde la red al coordinador.

Los mensajes permiten conocer y configurar desde el PC las coordenadas de los nodos de referencia, la posición del nodo móvil, los dispositivos conectados a la red y los parámetros A y n (estos parámetros se explicarán en detalle en el siguiente capítulo 5, con el motor de localización - Location Engine) para el cálculo de la posición del nodo móvil.

Características de los mensajes

- Cada dirección IEEE se compone de 64 bits (8 bytes), por lo que se necesitan 16 caracteres ASCII para su transmisión.
- Los elementos fijos de cada mensaje del ILS son por tanto 36 bytes (1+16+16+3).
- En el chip CC2430/31, la máxima longitud de una trama es de 127 bytes. Descontando hasta 31 bytes, necesarios para las capas inferiores del protocolo, hay por tanto 96 bytes para mensajes.
- Descontando los 36 bytes fijos (por cada mensaje del ILS, restan 60 bytes de carga máxima a incluir en cada mensaje (campo datos).
- El formato de los bytes de datos no está definido salvo por las siguientes excepciones: @, \$, CR y LF.
- El envío de variables binarias dentro de los datos ILS será entonces en hexadecimal y ASCII, por lo que cada byte de información necesitará de dos caracteres para su envío.

4.3.3.1. Mensajes del coordinador al nodo móvil

Para activar el sondeo de posición de un móvil:

@	00124B00000201F0	00124B0000041014	&	SC	\$
	Dir.Coordinador	Dir. Móvil			

Tabla 4.2: Activar sondeo de posición de un nodo móvil

Para detener el sondeo de posición:

@	00124B00000201F0	00124B0000041014	&	SP	\$
	Dir.Coordinador	Dir.Móvil			

Tabla 4.3: Detener sondeo de posición de un nodo móvil

Para cargar los parámetros A y n del nodo móvil:

@	00124B00000201F0	00124B0000041014	*	43	15	\$
	Dir.Coordinador	Dir.Móvil		A	n	

Tabla 4.4: Cargar parámetros A y n del nodo móvil

Solicitud de parámetros A y n de un nodo móvil:

@	00124B00000201F0	00124B0000041014	-	\$
	Dir.Coordinador	Dir.Móvil		

Tabla 4.5: Solicitud de parámetros A y n del nodo móvil

4.3.3.2. Mensajes del nodo móvil al coordinador

Mensaje de posición (respuesta a la solicitud de sondeo de posición)

@	00124B0000041014	00124B00000201F0	&	X00625	Y00450	%40	x09	y05	04	01	\$
	Dir.Móvil	Dir.Coordinador		x	y	rssi	xp	yp	n	z	

Tabla 4.6: Respuesta al sondeo de posición del nodo móvil

- x : Coordenada x de la posición del móvil (expresado en cm).
- y : Coordenada y de la posición del móvil (expresado en cm).
- $rssi$: nivel de potencia RSSI del nodo de referencia más potente que recibe el móvil.
- xp : posición x del nodo de referencia más potente que recibe el móvil (expresado en metros).

- *yp*: posición y del nodo de referencia más potente que recibe el móvil (expresado en metros).
- *n*: número de nodos de referencia utilizados para el calculo de la posición.
- *z*: planta en la que se encuentra el móvil.

Devolución de parámetros A y n (respuesta a la carga de parámetros A y n)

@	00124B0000041014	00124B00000201F0	*	A40	N12	\$
	Dir.Móvil	Dir.Coordinador		A	n	

Tabla 4.7: Devolución de parámetros A y n tras una carga de estos

Devolución de parámetros A y n tras una solicitud de estos parámetros

@	00124B0000041014	00124B00000201F0	-	A40	N12	\$
	Dir.Móvil	Dir.Coordinador		A	n	

Tabla 4.8: Devolución de parámetros A y n tras una solicitud de estos

Conexión a la red de un nodo móvil

00124B0000090AC4	+	+
Dir.Móvil		

Tabla 4.9: Conexión a la red de un nodo móvil

4.3.3.3. Mensajes del coordinador a un nodo de referencia

Solicitud de las coordenadas de un nodo de referencia

@	00124B00000201F0	00124B0000020800	?	\$
	Dir.Coordinador	Dir.Referencia		

Tabla 4.10: Solicitud de coordenadas a un nodo de referencia (en metros)

Carga de coordenadas a un nodo de referencia

@	00124B00000201F0	00124B0000020800	/	x00.50	y006.50	Z00	\$
	Dir.Coordinador	Dir.Referencia		x	y	z	

Tabla 4.11: Carga de coordenadas a un nodo de referencia (en metros)

4.3.3.4. Mensajes de un nodo de referencia al coordinador

Devolución de coordenadas de un nodo de referencia

@	00124B0000020800	00124B00000201F0	?	X00.50	Y006.50	03	\$
	Dir.Referencia	Dir.Coordinador		x	y	z	

Tabla 4.12: Devolución de coordenadas de un nodo de referencia (en metros)

Confirmación de coordenadas cargadas

@	00124B0000020800	00124B00000201F0	/	OK	\$
	Dir.Referencia	Dir.Coordinador			

Tabla 4.13: Confirmación de coordenadas cargadas

Conexión a la red de un nodo de referencia

00124B0000020800	+	+
Dir.Referencia		

Tabla 4.14: Conexión a la red de un nodo de referencia

4.4. Interfaz entre la red de localización y otros dispositivos

Dentro de la información que puede procesar y enviar la red ZigBee, interesa que el nodo móvil sea capaz de comunicarse mediante RF con otros dispositivos inalámbricos que permitan realizar algún procesamiento de la información contenida en los mensajes, en este Trabajo Fin de Grado por ejemplo se ha utilizado el módulo BlueBoard LPC1768H. La principal razón para la utilización de estos módulos es que se podría conocer la posición del móvil on-line, pero también otra importante razón es que estos dispositivos poseen internamente un procesador ARM Cortex-M3 de mayor capacidad que el del CC243x; así, estos módulos permiten realizar el procesamiento de ciertos algoritmos de estimación de la posición del móvil, que no son capaces de realizar los chips CC243x debido a su limitada capacidad de procesamiento.

Para la interconexión del módulo ZigBee y el dispositivo BlueBoard LPC1768H se hace uso del módulo diseñado para las balizas fijas. Mediante este módulo se conecta el puerto serie del módulo CC2431 con la placa BlueBoard LPC1768H; simplemente es necesario conectar un pin de salida del módulo CC2430 (P1.5), por el cual saldrá la información, con un pin de entrada del BlueBoard LPC1768H (RX) como se puede observar en el esquema de la figura 4.15 y en la foto de la figura 4.16. El nodo móvil captura la información correspondiente a las balizas fijas y se la envía al módulo BlueBoard LPC1768 mediante el puerto serie. Una vez recibida la información, el módulo BlueBoard LPC1768H la procesa utilizando los algoritmos que se describirán en el siguiente capítulo. También el dispositivo BlueBoard LPC1768H posee la capacidad de comunicarse con el usuario mediante un display, lo que permitirá que el usuario reciba la información correspondiente a la estimación de posición del móvil por esta vía. También indicar que las pruebas y resultados realizados a este sistema propuesto aparecen en [Die12].

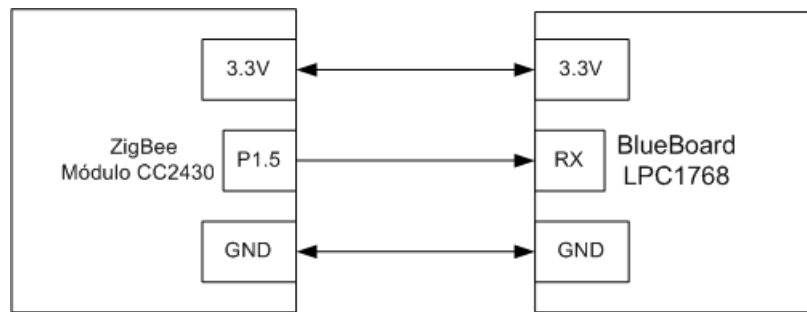


Figura 4.15: Esquema de conexión entre nodo móvil (CC2431) y BlueBoard LPC1768H

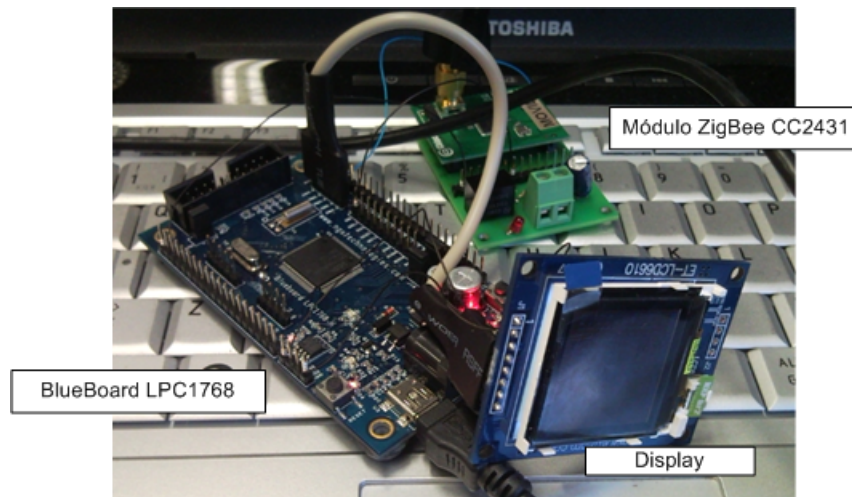


Figura 4.16: Nodo móvil integrado con dispositivo BlueBoard LPC1768H

4.4.1. Características del módulo BlueBoard LPC1768H

A continuación se indican las principales características del dispositivo BlueBoard LPC1768H.

Características Hardware

- Ethernet MAC.
- USB interface.
- 8 canales DMA.
- 4 UARTs.
- 2 SSP.
- SPI interface.
- 3 I2C interfaces.
- 70 pines E/S.

Características Software

- 64 KB de memoria RAM.
- 512 KB de memoria Flash.
- 256 KB de memoria EEPROM.
- Hasta 32 MHz.
- 1 canal DAC de 10 bits.
- 8 canales ADC de 12 bits.

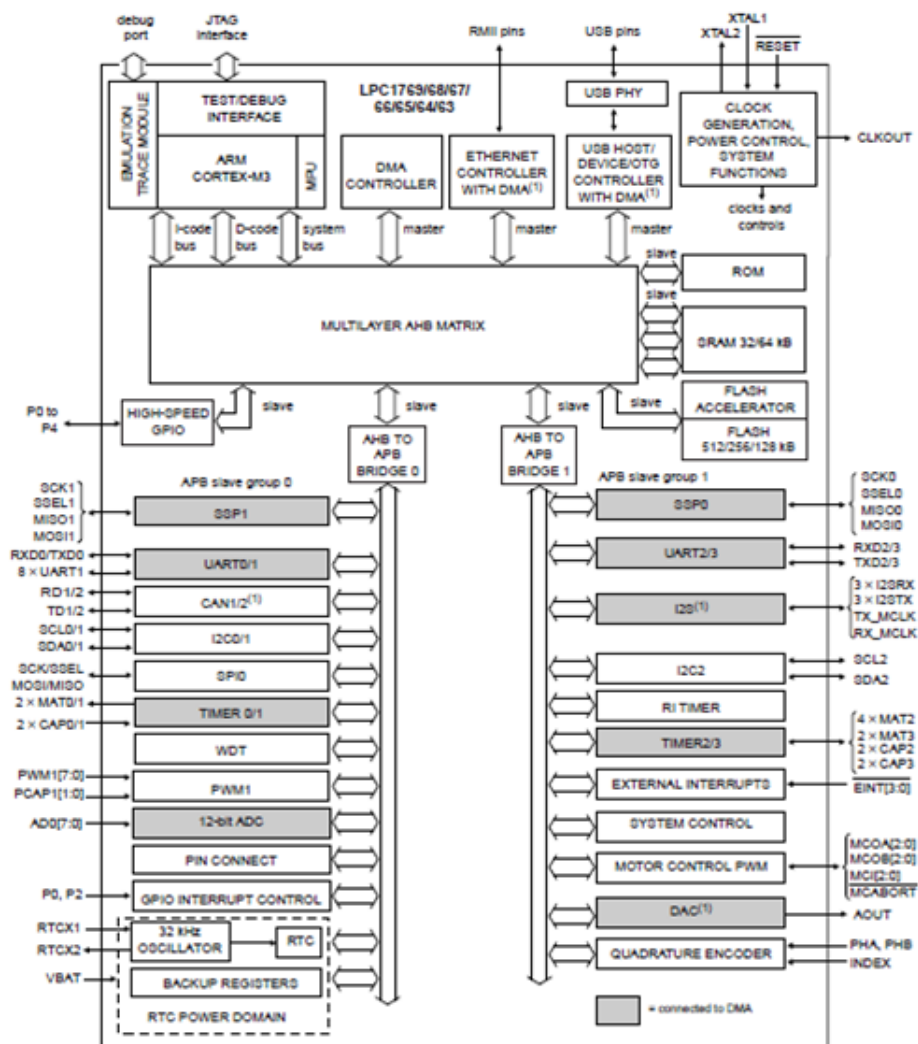


Figura 4.17: Diagrama de bloques LPC1768H

4.4.2. Comunicación con el BlueBoard LPC1768H a través de la red ZigBee

Como se ha indicado anteriormente en esta sección se realiza una comunicación entre el módulo BlueBoard LPC1768H y la red ZigBee para procesar de una manera más efectiva los

datos que se obtienen de ella, por lo que es necesario crear unos mensajes de comunicación entre ambas partes. En este primer mensaje del nodo móvil al módulo BlueBoard LPC1768H se envía la posición estimada por Location Engine (coordenada x e y) y la información que recibe el móvil correspondiente a las balizas o nodos de referencia de mayor nivel de potencia RSSI, sus coordenadas x e y, y su nivel RSSI, hasta de 10 balizas o nodos de referencia.

&	X36.50	Y12.00	x4175	y17.50	R60	x4175	y1000	R72	...	\$
	X	Y	x_1	y_1	rss_i_1	x_2	y_2	rss_i_2	...	

Tabla 4.15: Información de Location Engine y de las balizas de referencia

A continuación se describe en detalle la información contenida en el mensaje de la tabla 4.15.

- *X*: Coordenada x estimada por Location Engine de la posición del móvil (en metros).
- *Y*: Coordenada y estimada por Location Engine de la posición del móvil (en metros).
- *x₁*: Coordenada x de la baliza de mayor nivel de potencia RSSI (en metros).
- *y₁*: Coordenada y de la baliza de mayor nivel de potencia RSSI (en metros).
- *rss_{i1}*: Nivel RSSI de la baliza de mayor nivel de potencia RSSI.
- *x₂*: Coordenada x de la baliza de 2º mayor nivel de potencia RSSI (en metros).
- *y₂*: Coordenada y de la baliza de 2º mayor nivel de potencia RSSI (en metros).
- *rss_{i2}*: Nivel RSSI de la baliza de 2º mayor nivel de potencia RSSI.

También se ha programado otro tipo de mensaje para reducir el número de bytes que se envían. Debido a que las balizas de referencia tienen una posición siempre fija, se sustituyen sus coordenadas por un número indicativo, lo que reduce el tamaño del mensaje considerablemente y permite enviar información correspondiente a más balizas.

&	X36.50	Y12.00	N06	B02	R55	B03	R62	B05	R72	...	\$
	X	Y	n	bal_1	rss_i_1	bal_2	rss_i_2	bal_3	rss_i_3	...	

Tabla 4.16: Información de Location Engine y de las balizas de referencia comprimida

Por último, se describe en detalle la información contenida en el mensaje de la tabla 4.16.

- *X*: Coordenada x estimada por Location Engine de la posición del móvil (en metros).
- *Y*: Coordenada y estimada por Location Engine de la posición del móvil (en metros).
- *n*: Número de balizas de referencia usadas por Location Engine para la estimación de la posición del móvil.
- *bal₁*: Coordenadas x e y de la baliza de mayor nivel de potencia RSSI.

- $rssi_1$: Nivel RSSI de la baliza de mayor nivel de potencia RSSI.
- bal_2 : Coordenadas x e y de la baliza de 2º mayor nivel de potencia RSSI.
- $rssi_2$: Nivel RSSI de la baliza de 2º mayor nivel de potencia RSSI.
- bal_3 : Coordenadas x e y de la baliza de 3º mayor nivel de potencia RSSI.
- $rssi_3$: Nivel RSSI de la baliza de 3º mayor nivel de potencia RSSI.

Capítulo 5

Estimación de la posición del móvil. Algoritmos de Localización

El proposito de nuestro sistema de localización es estimar la posición del móvil en función de la información obtenida de los dispositivos físicos que forman la red. En este Trabajo, los dispositivos físicos proporcionan información respecto del nivel de potencia RSSI. Por lo tanto se deberán emplear algoritmos que con esa información y otras como las coordenadas de las balizas fijas permitan estimar la posición del móvil.

En este capítulo primeramente se analizará el algoritmo de posición utilizado por Texas Instruments en sus dispositivos RF ZigBee y que se añade como un periférico más en los chips CC2431, denominado Motor de Localización (Location Engine). Seguidamente se verá el algoritmo propio desarrollado basado en Multilateración con Ejes Radicales (ER), incluyendo una Evaluación de Disparidad de Balizado (DB) que permite una mayor precisión en la estimación de posición del nodo móvil. Por ultimo, se explica el denominado *Ajuste a rutas* que limita el movimiento del móvil por las zonas deseadas, es decir, el movimiento del móvil se limitará a ciertas zonas del entorno como pueden ser el centro de pasillos o el paso a través de puertas.

5.1. Motor de Localización - Location Engine

El periférico de los chips CC2431 Motor de localización o Location Engine es usado para estimar la posición del nodo móvil dentro de una red de balizas o nodos de referencia. Los nodos de referencia se encuentran en unas coordenadas fijas o conocidas, en las que han sido instaladas previamente.

El motor de posición pone en práctica un algoritmo de cálculo distribuido que usa el nivel de potencia de señal recibido (Received Signal Strength Indication - RSSI), los valores de las coordenadas de los nodos de referencia conocidos y los parámetros que caracterizan el medio en el se encuentra la red ZigBee. Dicho algoritmo es una patente propiedad de Texas Instruments [TI11] y que ha sido desarrollada por Motorola Labs [TK06]. El principal inconveniente de este motor de posición es que es un modulo IP (Intellectual Property). Por tanto, debido a la falta de información de su estructura y a su naturaleza hard, no se conoce detalladamente como funciona y no se puede modificar.

La realización de la estimación de la posición en el nodo móvil reduce el tiempo de conmutación y el tráfico de datos de la red.

El motor de localización tiene las siguientes características principales:

- Utiliza de 3 a 16 nodos de referencia para el algoritmo de estimación de la posición.
- La resolución de la estimación es de 0.25 metros, aunque dependerá de ciertos factores que se describirán a continuación.
- Tiempo de estimación de la posición del nodo es de $50 \mu s$ a 13 ms.
- Rango de localización en una celda de máximo 64×64 metros ($4096 m^2$). El posicionamiento fuera de esta región es posible añadiendo los offsets necesarios en X e Y.
- Valoración de posición con uso mínimo de CPU.

Para conseguir una exactitud lo mayor posible hay que utilizar antenas con un patrón de radiación omnidireccional. El error de posición dependerá del entorno, del modelo de despliegue de nodos de referencia y la densidad de nodos de referencia en dicho entorno. En general, tener más nodos de referencia disponibles mejora la estimación de posición del móvil.

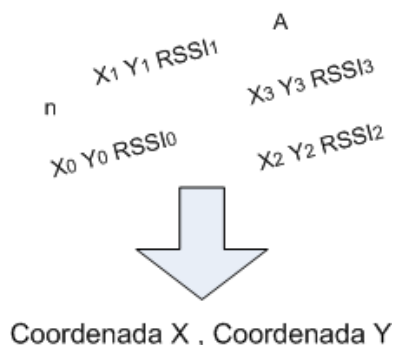


Figura 5.1: Entradas y Salidas del Motor de Localización

5.1.1. Operación del Motor de Localización

En esta sección se explican los pasos básicos para obtener estimaciones de posición del Motor de Localización. El Motor de Localización requiere que un conjunto de 3 a 16 coordenadas de referencia sea introducido junto con otro conjunto de parámetros del nivel de RSSI medidos. La salida del Motor de Localización consiste en un par de coordenadas de posición estimadas, figura 5.1.

En el diagrama de bloques de la figura 5.2 se puede observar todo el proceso del Motor de Localización. Como por ejemplo, antes de escribir ningún dato de entrada, se ha de escribir '1' en el bit enable del motor de localización, LOCENG.EN. Cuando el Motor de Localización no está usándose, se escribe '0' en LOCENG.EN y así se reduce el consumo de potencia del chip CC2431.

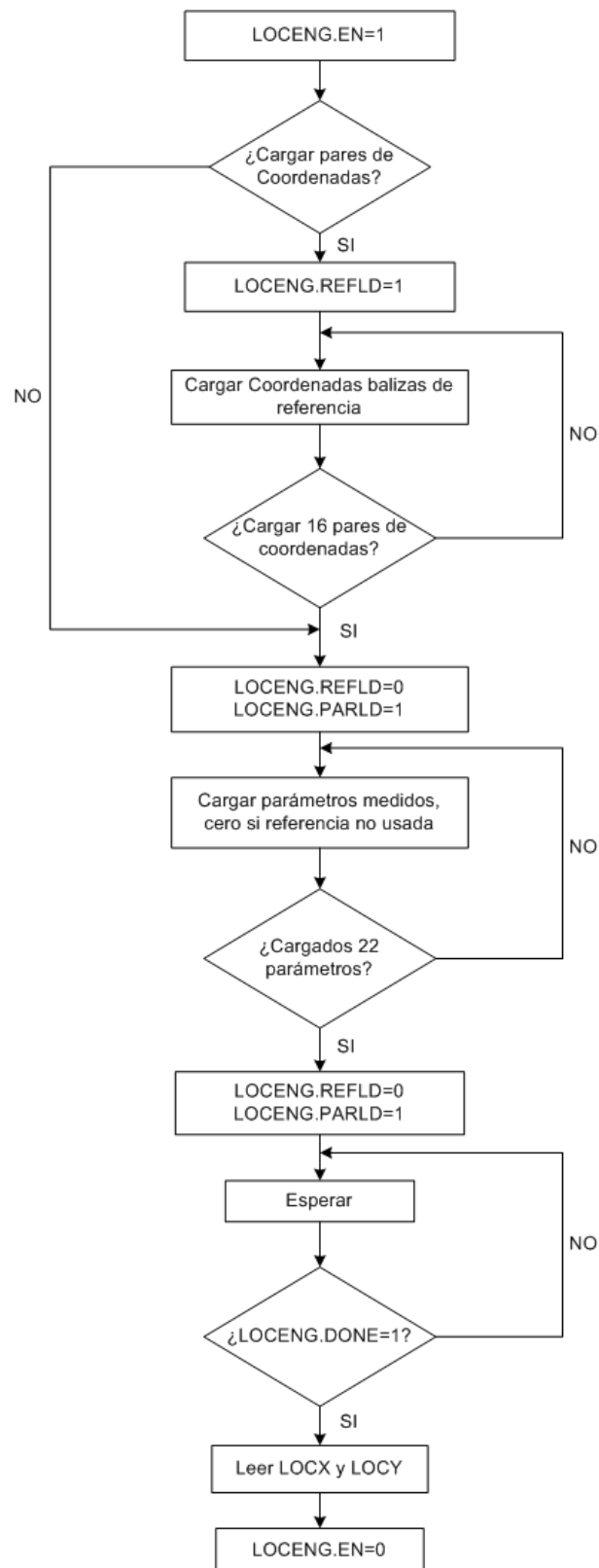


Figura 5.2: Diagrama de bloques del Motor de Localización - Location Engine

5.1.2. Registros de Location Engine

En este apartado se describen los registros RF asociados al Motor de Localización:

- *LOCENG*: control y estado del Motor de Localización (Location Engine).
- *REFCOORD*: coordenadas de referencia que se introducen.
- *MEASPARM*: parámetros que se introducen, [A, n, Xmin, Xdelta, Ymin, Ydelta, rssi0, rssi1,..., rssi15].
- *LOCX*: estimación de posición, coordenada x.
- *LOCY*: estimación de posición, coordenada y.

5.1.3. Coordenadas de referencia

El Motor de Localización requiere que sean introducidas entre 3 y 16 coordenadas de referencia [X0,Y0,X1,Y1,X2,Y2,...,X15,Y15] para estimar una posición.

Las coordenadas de referencia expresan cada posición de nodos de referencia en metros, como valores en el intervalo [0,63.75] metros con una precisión de 0.25 metros.

Se usa el formato de datos de coma fija con dos bits para la representación de la parte fraccionaria y seis para la parte no fraccionaria.

Así por ejemplo 40.25 se representa como 0xA1.

- $40.25 = 0xA1 = 10100001$
- $40 = 101000$
- $0.25 = 01$ (0.00=00, 0.25=01, 0.50=10, 0.75=11)

Las coordenadas de referencia son cargadas en el registro REFCOORD. Antes de escribir en REFCOORD, se debe escribir '1' en el bit LOCENG.REFLD del registro para indicar que un juego de coordenadas de referencia está siendo escrito.

Una vez que el proceso de carga comienza (LOCENG.REFLD=1), siempre se deben escribir 16 pares de coordenadas (coordenada x e y). Sin embargo, es posible para el Motor de Localización usar menos de 16 pares de coordenadas de referencia, marcando ciertas coordenadas de referencia como no usadas. Para llenar las ranuras de coordenada de referencia no usadas, se utilizan ceros y serán interpretados como no usados cuando el valor de RSSI cargado para esas coordenadas es cero.

Las coordenadas de referencia son escritas en el orden [X0,Y0,X1,Y1,...,X15,Y15] al registro REFCOORD. Cuando todas las coordenadas han sido escritas, se escribe '0' en el bit LOCENG.REFLD del registro REFCOORD.

5.1.4. Niveles de potencia de señal emitidos

Una vez introducidas las coordenadas de referencia deben ser introducidos los niveles de potencia RSSI, medidos desde los diferentes nodos de referencia, si no se llega a 16 nodos, se introducen ceros.

Los valores de nivel de potencia RSSI están dentro del intervalo $[-40 \text{ dBm}, -90 \text{ dBm}]$ con una precisión de 0.5 dBm. El signo negativo se quita en el valor escrito. Por ejemplo, en el caso de que el nivel de potencia RSSI sea -63.5 dBm, sería escrito en el motor de posición como 63.5.

También se introducen cuatro coordenadas de límite de posición que restringe la distancia de búsqueda de la posición, reduciéndose así los tiempos de cálculo.

Además el Motor de Localización utiliza los parámetros A y n que deben ser ajustados para describir el ambiente o el entorno de propagación en el cual se encuentra la red RF ZigBee. Estos parámetros se describen en la sección siguiente.

5.1.5. Parámetros de caracterización del entorno

Parámetro A

Según las hojas de características del CC2431 que proporciona el fabricante Texas Instruments, A es definido como el valor absoluto de potencia media en dBm recibida a la distancia de un metro del transmisor, asumiendo un modelo de radiación omnidireccional. Por ejemplo, si la potencia media recibida en un metro es -37 dBm, el parámetro A es indicado como 37.

Este parámetro A introducido al Motor de Localización debe estar en el intervalo $[30, 50]$.

Parámetro n

También el parámetro n es definido en las hojas de características y se define como el exponente de pérdida de potencia en el camino que sufre el valor del nivel de potencia RSSI, el cual decrece con el aumento de la distancia al transmisor. Este decrecimiento es proporcional a la distancia entre el transmisor y receptor.

Este parámetro depende principalmente de la densidad de paredes y muros, y por supuesto de su espesor. Y depende mucho de cada entorno, por lo que la mejor forma de obtenerlo (según el fabricante), es realizar una pequeña calibración con distintos valores hasta conseguir una buena exactitud.

El parámetro n sería la pendiente de la curva que se ve en la figura 5.3, en la que se muestran valores de RSSI a diferentes distancias. El parámetro n debe ser un valor entero seleccionado de la siguiente tabla:

Por ejemplo, en el caso en el que se obtenga $n=3.78$, el valor disponible más cercano en la tabla 5.1 es $n=3.75$, que corresponde con el índice 19. Por lo tanto, el valor entero 19 es el que se debe usar, para que el Motor de Localización estime de una forma correcta y precisa. Este valor comprendido entre 0 y 31, dependerá del medio en que se encuentre la red ZigBee, por lo

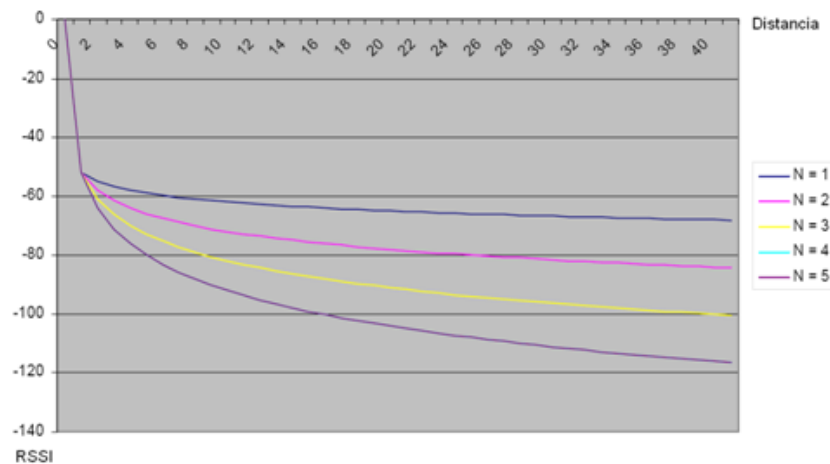


Figura 5.3: Variación del nivel de potencia RSSI con la distancia

que será estimado mediante una pequeña calibración.

Obtención experimental de los valores de los parámetros A y n

Los parámetros A y n pueden ser estimados recopilando información de valores de potencia RSSI recibidos a diferentes distancias. Para este cálculo se ha partido del estudio realizado en el proyecto [Gar10] ya que el entorno de trabajo es similar.

Para la estimación del parámetro A, se han realizado pruebas, siguiendo las indicaciones de las hojas de características del fabricante, que consisten en hacer medidas de la potencia de la señal a un metro de distancia en diferentes posiciones 5.4. El valor de A debería ser igual en todas direcciones, pero es muy difícil que las antenas tanto del transmisor como del receptor sean perfectamente omnidireccionales, así que se utiliza un valor promedio.

Se han utilizado diferentes dispositivos colocándolos en cuatro posiciones distintas todas ellas emitiendo a un metro del receptor. Al receptor, situado en el centro de la circunferencia, se le carga en memoria el software "General Packet Sniffer", una de las utilizadas de software que ofrece Texas Instruments en su web (www.ti.com) para este chip y que permite captar las tramas ZigBee que se están emitiendo en su radio de alcance y su nivel de potencia y visualizarlas en el PC, con una interfaz, que adquiere los datos a través del puerto serie.

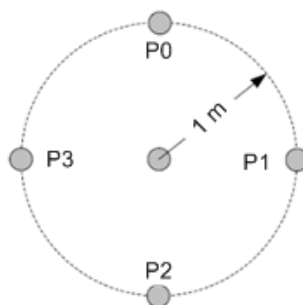


Figura 5.4: Situación de los módulos ZigBee para la calibración del parámetro A

n_index	n	n_index	n
0	1.00	16	3.375
1	1.25	17	3.50
2	1.50	18	3.626
3	1.75	19	3.750
4	1.875	20	3.875
5	2.00	21	4.00
6	2.125	22	4.125
7	2.250	23	4.250
8	2.375	24	4.375
9	2.50	25	4.50
10	2.625	26	4.625
11	2.75	27	5.00
12	2.875	28	5.50
13	3.00	29	6.00
14	3.125	30	7.00
15	3.25	31	8.00

Tabla 5.1: Parámetro n

Tras realizar las pruebas, los resultados fueron los mostrados en la tabla 5.2.

Posición	Chip 1	Chip 2	Chip 3	Chip 4	Chip 5
P0	-45	-43	-43.5	-46	-43
P1	-45	-44	-41	-42	-48
P2	-43	-43	-43	-43	-42
P3	-49	-49	-44	-48	-51

Tabla 5.2: Medidas para el cálculo del parámetro A

Indicar que según las hojas de características del fabricante, los valores medidos tienen aplicado un offset de -45 dBm respecto al valor real, y que la estimación de A tendrá ese offset aplicado.

Con las medidas realizadas se estima el valor de A, realizando una media de las medidas y en valor absoluto, siendo $A=44.775$. Al tener que ser un número entero, el valor ideal de A para la zona en la que se han realizado las pruebas es $A=45$.

Para la estimación del parámetro n, se han utilizado los resultados del proyecto [GJB06] sobre posicionamiento ZigBee, cuyo informe de medidas con la distancia en la zona en la que se encuentra esta red ZigBee, Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico en la Universidad de Alcalá, concluye que el valor de n es $n=3.3$. Con este valor y viendo la tabla 5.1 de las hojas de características del chip, se determina que la entrada del valor n más óptima para el entorno en el que se utilizará el sistema es de $n=15$.

5.1.6. Carga de parámetros

Todos los parámetros descritos en las secciones anteriores son cargados en el registro MEAS-
PARM. Antes de escribir en MEASPARM, se escribe '1' en el bit LOCENG.PARLD del re-

gistro para indicar que un juego de parámetros está siendo escrito. Una vez que el proceso de carga del parámetro comienza (LOCENG.PARLD=1), deben ser escritos 22 parámetros. Los parámetros medidos deben ser escritos en el registro MEASPARM en el siguiente orden [A,n,Xmin,Xdelta,Ymin,Ydelta,rssi0,rssi1,...,rssi15].

Los valores Xmin, Xdelta, Ymin e Ydelta son los valores que delimitan el espacio en el que se va a localizar (máximo 63.75 m).

Una vez que el proceso de carga de parámetros comienza (LOCENG.PARLD=1) debe ser completado con 22 parámetros, incluidos los 16 niveles de potencia RSSI. Por último, debe ser escrito un '0' en el bit LOCENG.PARLD.

5.1.7. Estimación de posición

El Motor de Localización tiene como salida las coordenadas x e y en metros en el intervalo [0,63.75] con una resolución de 0.25 m.

Cuando las coordenadas de referencia y los parámetros medidos han sido cargados, la estimación de posición es calculada desde el instante de escritura de un '1' en el bit LOCENG.RUN. Las coordenadas calculadas se leen en los registros LOCX y LOCY cuando LOCENG.DONE es puesto a '1', con el mismo formato explicado para las coordenadas de los nodos de referencia. El tiempo hasta que las coordenadas estimadas pueden ser leídas varía con los parámetros de restricción de la zona de búsqueda (Xmin, Xdelta, Ymin, Ydelta), de 50 μs a 13 ms (32 MHz de frecuencia de reloj) después de que LOCENG.RUN es puesto a '1'.

El Motor de Localización no produce ninguna petición de interrupción. El valor de la coordenada real X calculada por LOCX, se obtiene tras realizar la siguiente operación $X = (XLOCX - Xmin - 1) \% (Xdelta + 1) + Xmin$ donde XLOCX es el valor leído del registro LOCX, y Xmin y Xdelta son los parámetros divisorios usados como entradas para limitar la búsqueda.

Las coordenadas estimadas permanecen válidas en LOCX y LOCY hasta que los nuevos resultados hayan sido calculados o hasta un reinicio (LOCENG.EN debe ser '1' durante la operación del Motor de Localización).

5.2. Multilateración con Ejes Radicales

Como se ha indicado en el apartado anterior, el Motor de Localización (Location Engine) es un módulo propio del fabricante Texas Instruments que permite la localización de un móvil, pero es cerrado para el usuario. Por tanto surge la necesidad de disponer de un software propio que permita estimar la posición de un móvil de una manera precisa y rápida.

Una vez que se conoce el nivel de potencia RSSI de cada una de las balizas o nodos de referencia que llegan al nodo móvil, que se encuentran en su rango de cobertura, es fácil estimar la distancia entre el nodo móvil y cada una de dichas balizas, ya que se conoce su potencia de emisión así como los parámetros del entorno en el que se encuentran.

Las coordenadas (x,y) de la posición donde se encuentra el móvil $M(x,y)$ se estimarán mediante la técnica de multilateración propuesta en [Bah09]. En dos dimensiones, la técnica de multilateración se define como el método para determinar la intersección de N circunferencias ($N \geq 3$) con centro la posición de los nodos de referencia o balizas (NF_{xi}, NF_{yi}) , y radio la distancia estimada del móvil a localizar a cada uno de los nodos de referencia, \hat{d}_i , donde en ambos casos $i = 1, 2, \dots, M$.

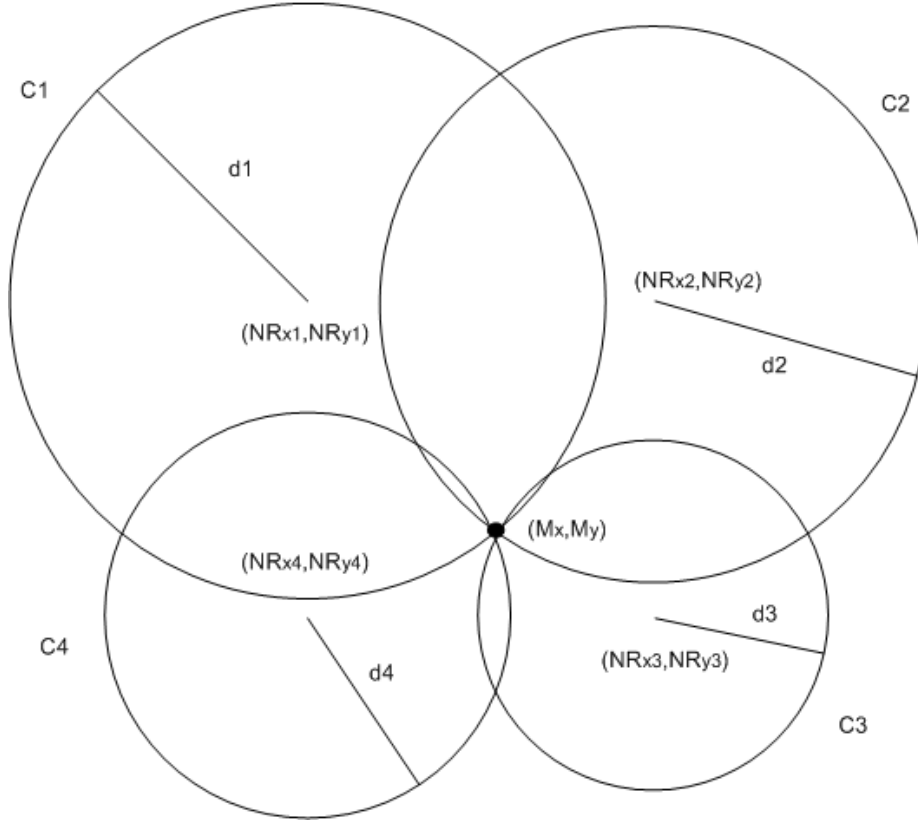


Figura 5.5: Resolución gráfica del sistema de ecuaciones compuesto por 4 circunferencias cuando las estimaciones de distancia, \hat{d}_i , son precisas

Dando por hecho que el número de nodos de referencia dentro del rango de cobertura del nodo inalámbrico a localizar es mayor del mínimo requerido, es decir, en dos dimensiones (2D) el número de nodos de referencia mayor o igual a tres y en tres dimensiones (3D) mayor o igual a cuatro, entonces se debe resolver un sistema sobre-determinado de ecuaciones cuadráticas, aquellas que definen analíticamente las N circunferencias. Como se puede observar en la figura 5.5 ($N > 3$), si todas las estimaciones de distancia fueran precisas, las N circunferencias con centro (NF_{xi}, NF_{yi}) y radio \hat{d}_i se cortarían en único punto. Sin embargo, debido a que \hat{d}_i estará afectada por errores, será difícil que coincida con la distancia real. Estos errores se deben a que la distancia \hat{d}_i se calcula a partir de los niveles de potencia RSSI recibidos por el nodo móvil y en los cuales influyen las atenuaciones y el medio como se ha explicado en apartados anteriores. En consecuencia, las N circunferencias no se cortarían en un único punto, motivo por el cual se buscará la solución del sistema sobre-determinado de N ecuaciones cuadráticas en el sentido de mínimos cuadrados. Por tanto, la posición del nodo móvil, $\mathbf{X} = [x, y]^T$, puede ser estimada encontrando el valor de $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$ que satisfaga:

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min \sum_{i=1}^M [\sqrt{(NR_{xi} - x)^2 + (NR_{yi} - y)^2} - \hat{d}_i]^2 \quad (5.1)$$

La resolución de (5.1) es compleja y difícil de analizar. Por lo tanto, en lugar de usar circunferencias como ecuaciones para determinar la posición del móvil a localizar, se utilizarán los ejes radicales resultado de combinar, sin repetición, todos los pares de las N ecuaciones de circunferencias. De esta forma el complejo problema representado en (5.1) se reduce a resolver $\frac{N(N-1)}{2}$ ecuaciones lineales por mínimos cuadrados, estando éstas definidas por los ejes radicales er_{ij} .

El eje radical o línea geométrica de potencia respecto de dos circunferencias es el lugar geométrico de los puntos con igual potencia geométrica respecto de ambas. Es decir, la longitud de los segmentos tangente a las dos circunferencias desde cada punto del eje radical es la misma. Siempre y cuando las dos circunferencias no sean concéntricas, hecho que nunca sucederá ya que no hay dos nodos de referencia en el mismo punto, el eje radical es una línea recta perpendicular a la línea que une los centros de las dos circunferencias y estará más próximo al centro de la circunferencia de menor radio. En la figura 5.6 se pueden observar las propiedades del eje radical, donde se aprecia cómo solo una circunferencia con centro cualquier punto del eje radical, corta perpendicularmente a las dos circunferencias involucradas en el cálculo del eje radical.

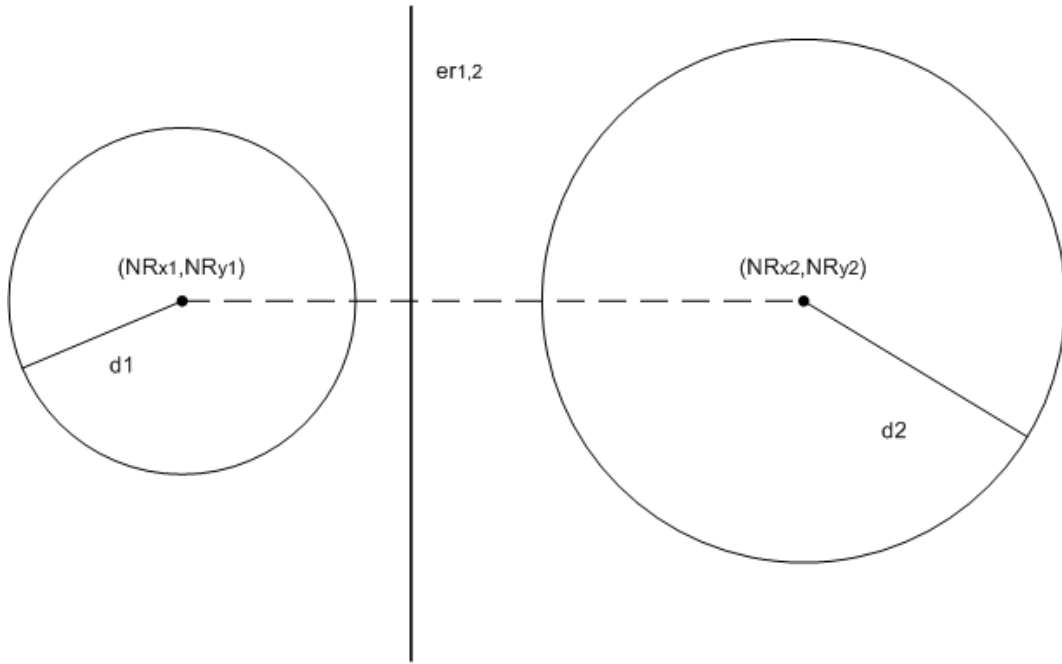


Figura 5.6: Propiedades del eje radical

Analíticamente la ecuación del eje radical er_{ij} se obtiene a partir de la resta de las ecuaciones correspondientes a las dos circunferencias involucradas. Así por ejemplo, dadas las ecuaciones de dos circunferencias (5.2), la ecuación correspondiente a su eje radical er_{ij} se muestra en (5.4).

$$(x - NR_{x1})^2 + (y - NR_{y1})^2 = \hat{d}_1^2 \quad (5.2)$$

$$(x - NR_{x2})^2 + (y - NR_{y2})^2 = \hat{d}_2^2 \quad (5.3)$$

$$er_{12} \rightarrow 2x(NR_{x2} - NR_{x1}) + 2y(NR_{y2} - NR_{y1}) = \hat{d}_1^2 - \hat{d}_2^2 - (NR_{x2}^2 - NR_{x1}^2) - (NR_{y2}^2 - NR_{y1}^2) \quad (5.4)$$

La potencia geométrica de un punto con respecto a una circunferencia es un número real que representa la distancia relativa del punto a la circunferencia. Por tanto, la potencia geométrica de un punto respecto de una circunferencia será cero si el punto pertenece a la circunferencia, negativa si el punto es interior a la circunferencia o positiva si es exterior. Así entonces, N circunferencias se cortarán en un único punto si, y sólo si, existe un punto cuya potencia geométrica respecto de todas las circunferencias es cero. En consecuencia, N circunferencias se cortarán en un único punto, si los $\frac{N(N-1)}{2}$ ejes radicales, obtenidos a partir de todas las posibles combinaciones de pares de circunferencias sin repetición, se cortan en un único punto y este punto pertenece a las N circunferencias.

Sea $\mathbf{Ax}=\mathbf{B}$ un sistema de ecuaciones lineales (se suponen 4 nodos de referencia o balizas) con:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} (NR_{x1} - NR_{x2}) & (NR_{y1} - NR_{y2}) \\ (NR_{x1} - NR_{x3}) & (NR_{y1} - NR_{y3}) \\ (NR_{x2} - NR_{x3}) & (NR_{y2} - NR_{y3}) \\ (NR_{x2} - NR_{x4}) & (NR_{y2} - NR_{y4}) \\ (NR_{x1} - NR_{x4}) & (NR_{y1} - NR_{y4}) \\ (NR_{x3} - NR_{x4}) & (NR_{y3} - NR_{y4}) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} d_1^2 - d_2^2 - (NR_{x1}^2 - NR_{x2}^2) - (NR_{y1}^2 - NR_{y2}^2) \\ d_1^2 - d_3^2 - (NR_{x1}^2 - NR_{x3}^2) - (NR_{y1}^2 - NR_{y3}^2) \\ d_2^2 - d_3^2 - (NR_{x2}^2 - NR_{x3}^2) - (NR_{y2}^2 - NR_{y3}^2) \\ d_2^2 - d_4^2 - (NR_{x2}^2 - NR_{x4}^2) - (NR_{y2}^2 - NR_{y4}^2) \\ d_1^2 - d_4^2 - (NR_{x1}^2 - NR_{x4}^2) - (NR_{y1}^2 - NR_{y4}^2) \\ d_3^2 - d_4^2 - (NR_{x3}^2 - NR_{x4}^2) - (NR_{y3}^2 - NR_{y4}^2) \end{pmatrix}$$

Donde NR_{xi} y NR_{yi} son las coordenadas de los centros de las circunferencias; la matriz \mathbf{A} con 6 filas y 2 columnas, y el vector \mathbf{B} columna con 6 componentes, son el resultado de combinar las circunferencias de dos en dos sin repetición. Si todos los ejes radicales er_{ij} se cortasen en un único punto, el sistema de ecuaciones lineales tendría una única solución y ésta coincidiría con la posición del móvil a localizar $M(x, y)$. Pero normalmente, dado que el vector \mathbf{B} depende de las estimaciones de distancia d y estas del nivel de potencia RSSI y este suele verse afectado por atenuaciones, el medio,..., los N ejes radicales er_{ij} no se cortarán en un único punto. En consecuencia, la solución del sistema de ecuaciones lineales $\mathbf{Ax}=\mathbf{B}$ será aquella que minimice las distancias de los N ejes radicales er_{ij} , y se puede expresar como $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}, \hat{y}]^t$, donde:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{(-1)} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B} \quad (5.5)$$

Como se observa en la figura 5.7, en una situación real las estimaciones de distancia \hat{d}_i no coinciden con los valores reales y por tanto los N ejes radicales er_{ij} no se cortan en un único punto. Una vez obtenida la región que delimitan los N ejes radicales er_{ij} , según [Bah09] la solución óptima es el punto que minimiza la suma de las distancias al cuadrado a cada uno de los ejes radicales.

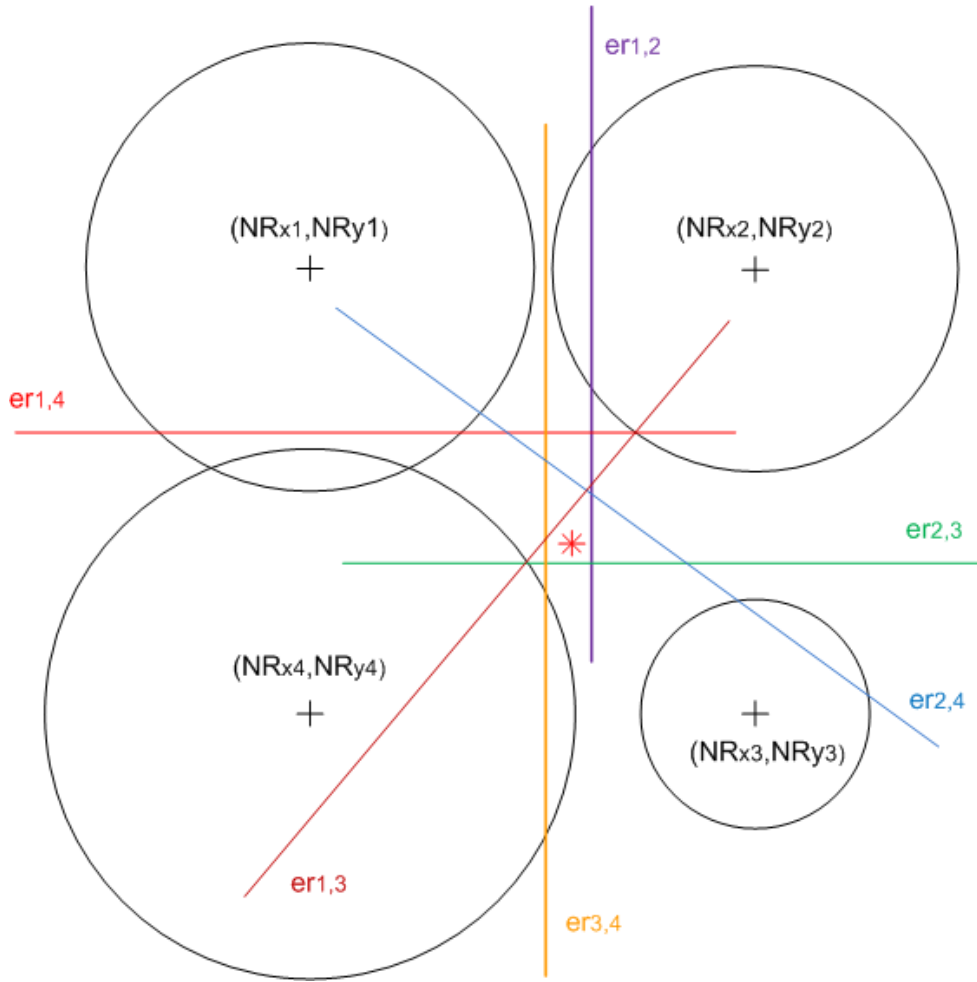


Figura 5.7: Resolución gráfica del sistema de ecuaciones correspondientes a 4 circunferencias cuando las estimaciones de distancia \hat{d}_i tienen error

5.2.1. Estimación de la posición en 2D5

Tras obtener las coordenadas x, y , queda únicamente el cálculo de la coordenada z del punto $M(x, y, z)$ donde se encuentra el móvil. La coordenada z se estima a partir del mayor número de nodos de referencia que hay de una cierta planta, es decir, el sistema determina de que nodos de referencia ha recibido el móvil el nivel de potencia RSSI, y de la planta que más nodos de referencia haya recibido, esa será fijada como la coordenada z . Por lo tanto el sistema propuesto estima la posición del móvil en 2.5 dimensiones (2D5), coordenadas x, y y la planta o piso en el que se encuentra.

5.3. Evaluación de Disparidad de Balizado

Como se ha visto en capítulos anteriores los niveles de potencia RSSI que recibe el móvil, varían considerablemente en función de las atenuaciones y del entorno. Por tanto, en ocasiones la posición estimada por el algoritmo de Multilateración con Ejes radicales no es del todo correcta, ya que cuando se utilicen un número elevado de nodos de referencia o balizas (5,6,7 u 8 nodos de referencia) para la estimación de la posición del móvil, de alguna de ellas se puede recibir un nivel de potencia RSSI que lleva a obtener un gran error en la medida, figura 5.8.

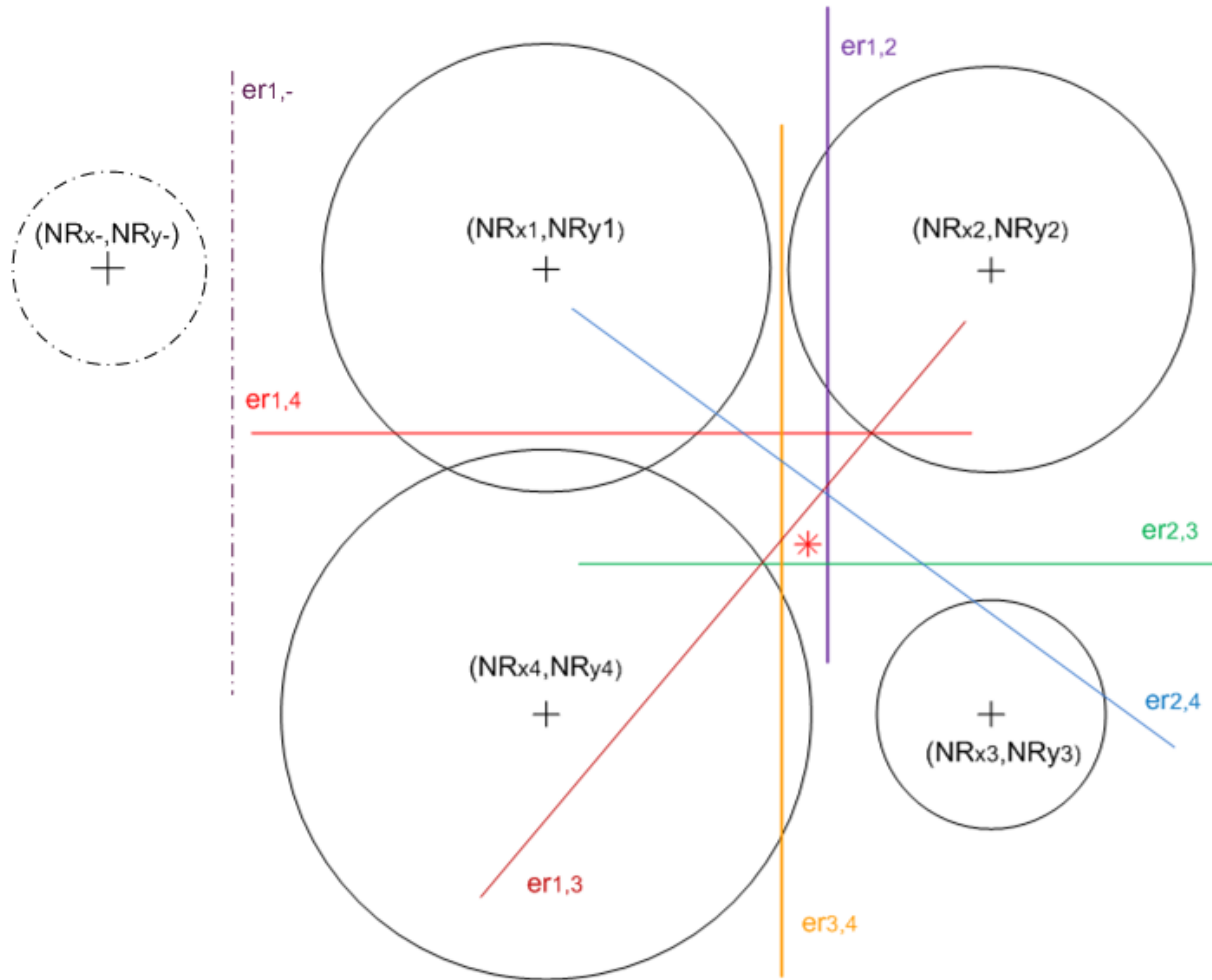


Figura 5.8: Algoritmo de localización *Multilateración con Ejes Radicales* con una baliza introduciendo un gran error. La estimación inicial (*) se vería muy desplazada al incluirse una medida muy dispar

El objetivo de esta evaluación de disparidad de balizado es descubrir, si lo hay, cual es el nodo de referencia o baliza que introduce un gran error en la medida. Como se puede observar en la figura 5.8, la baliza situada más a la izquierda en esta figura introduciría un gran error ya que su eje radical haría mucho mayor el área en el que se podría encontrar la posición estimada, por lo que si no existiera tal medida errónea, la posición estimada en este caso sería mucho más precisa (representada con un asterisco en la figura).

Partiendo de la propuesta [XC11] denominada *Algoritmo de predicción de distancia dinámica*, se puede estimar el error que puede introducir cada uno de los nodos de referencia que se encuentran dentro del rango de cobertura del móvil. Como se ha visto en el apartado anterior para estimar la distancia a la que se encuentra el nodo móvil de cada una de las balizas, se utiliza el nivel de potencia RSSI que recibe de cada una de ellas. Estas estimaciones no son exactas ya que en la medición del nivel RSSI influyen atenuaciones y el entorno, por lo que como se vio en la figura 5.5 todas las circunferencias no coinciden en un único punto, por lo que en la realidad ocurre lo que se aprecia en la figura 5.9.

Como se puede apreciar en la figura 5.9 se han utilizado 3 nodos de referencia, la baliza

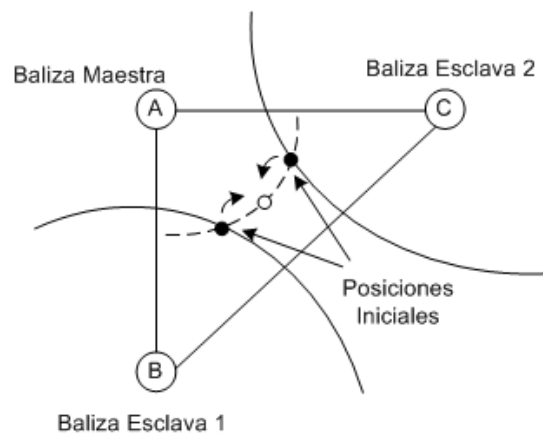


Figura 5.9: Corte de 3 circunferencias correspondiente a 3 nodos de referencia o balizas

maestra es la baliza de la cual el nodo móvil ha recibido un mayor nivel de potencia RSSI, y las otras dos balizas, balizas esclavas, son dos balizas del conjunto de balizas utilizadas en el algoritmo de localización que estima la posición del móvil.

Para la evaluación de disparidad de balizado, se forman grupos de 3 balizas denominados *tripletas*. Estas *tripletas* se forman a partir de las balizas que se utilizan para la estimación de la posición de móvil en cada instante, así por ejemplo, si se utilizan 6 balizas o nodos de referencia para la estimación de la posición del móvil, las tripletas que se crearían serían las siguientes:

	Baliza Maestra	Baliza Esclava 1	Baliza Esclava 2
Tripleta 1	1	2	3
Tripleta 2	1	2	4
Tripleta 3	1	2	5
Tripleta 4	1	2	6
Tripleta 5	1	3	4
Tripleta 6	1	3	5
Tripleta 7	1	3	6
Tripleta 8	1	4	5
Tripleta 9	1	4	6
Tripleta 10	1	5	6

Tabla 5.3: Combinación de balizas para formar tripletas

Indicar que siempre se toma como baliza maestra la baliza de mayor nivel de potencia RSSI del conjunto de balizas, y como balizas esclavas todas las combinaciones que pueden salir del resto de balizas, tabla 5.3. Una vez que se obtiene cada tripleta y obtenida la posición estimada, se realiza la evaluación de disparidad de balizado como se indica en la figura 5.10, es decir, se corrige la posición de las balizas esclavas de esa tripleta hasta que coincidan con la estimación de posición. Una vez corregida la posición de las balizas esclavas se calcula el error entre la posición actual de dichas balizas y su posición inicial.

Para obtener los resultados de la figura 5.10 se deben realizar una serie de operaciones. Es necesario calcular B_1C_1 mediante las ecuaciones (5.6, 5.7 y 5.8), para obtener el error entre la situación real de las balizas y la situación una vez realizada el Evaluación de Disparidad de

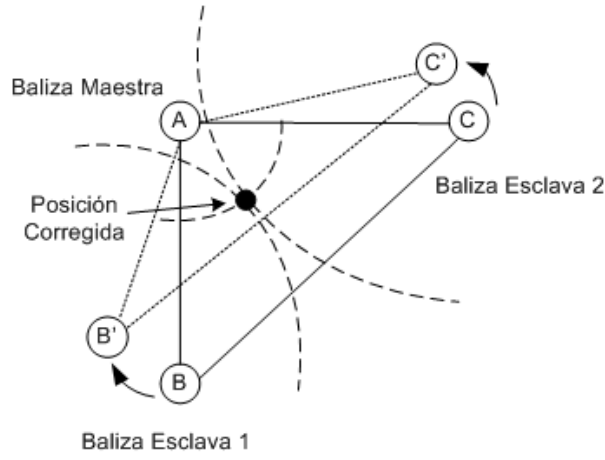


Figura 5.10: Desplazamiento virtual de las balizas para hacer coincidir todas las medidas en un solo punto

Balizado.

$$\angle A_1AB_1 = \arccos \frac{AB_1^2 + AA_1^2 - A_1B_1^2}{2 \cdot AA_1 \cdot AB_1} \quad (5.6)$$

$$\angle A_2AC_1 = \arccos \frac{AC_1^2 + AA_2^2 - A_1C_1^2}{2 \cdot AA_2 \cdot AC_1} \quad (5.7)$$

$$B_1C_1^2 = AC_1^2 + AB_1^2 - 2 \cdot AC_1 \cdot AB_1 \cdot \cos(\angle A_1AB_1 + \angle A_2AC_1) \quad (5.8)$$

Donde $AA_1 = AA_2$, $AC_1 = AC$, $AB_1 = AB$ y $error = |BC^2 - B_1C_1^2|$

Una vez obtenidos los errores de cada una de las tripletas, se observan las tripletas que introducen un desplazamiento de posición mayor de un cierto umbral en función de la media y la desviación típica. Detectadas las balizas que introducen mayor disparidad entre las posiciones reales y virtuales de las balizas, estas se eliminan de la estimación de la posición del móvil, tabla 5.4. En dicha tabla se puede observar que las balizas que introducen error podrían ser la baliza 3, 4 ó 5, pero al ser la baliza 4 la que coincide en los dos errores mayores, es la baliza que se elimina de la estimación de la posición del móvil.

En la figura 5.11 se puede observar un paseo de prueba en la 3ª planta del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico, explicado en detalle en la Prueba Experimental 2 del capítulo 6 *Pruebas Experimentales*. En este paseo, el móvil inicia su movimiento en el Laboratorio O31 (espacio abierto con 4 balizas) y se introduce en el pasillo O31 (espacio estrecho sin balizas) y se continua a cada uno de los baños del pasillo (espacios estrechos con una baliza cada uno) y luego finaliza en el mismo punto de inicio. Esta prueba es un claro ejemplo de la estructura del edificio con espacios abiertos y espacios cerrados.

Tras realizar varios paseos de prueba, siempre con el mismo recorrido (duración aproximada de 90 segundos), se han obtenido unos resultados más precisos al realizar la *evaluación de disparidad de balizado*, reduciendo el error entre la posición real del móvil y la estimación de posición en un 15 % con respecto a no utilizarla.

	Baliza Maestra	Baliza Esclava 1	Baliza Esclava 2	error	balizas erroneas
Tripleta 1	1	2	3		
Tripleta 2	1	2	4		
Tripleta 3	1	2	5		
Tripleta 4	1	2	6		
Tripleta 5	1	3	4	*	3 ó 4
Tripleta 6	1	3	5		
Tripleta 7	1	3	6		
Tripleta 8	1	4	5	*	4 ó 5
Tripleta 9	1	4	6		
Tripleta 10	1	5	6		

Tabla 5.4: Tripletas con mayor error en la estimación de posición

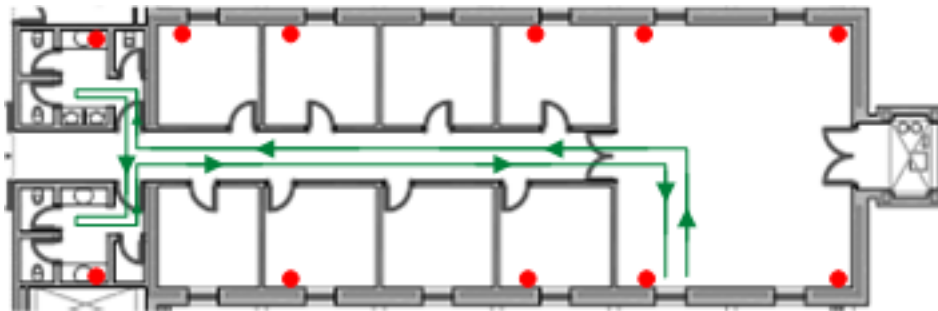


Figura 5.11: Paseo de prueba por la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

5.4. Ajuste a Grafos de Descripción Métrica - MDG

Una vez estimada la posición mediante los algoritmos de localización descritos anteriormente, se propone un sistema basado en grafos de descripción métrica del entorno que permita mejorar, tanto en términos cuantitativos como cualitativos, las estimaciones de posición del móvil.

Como se ha explicado anteriormente la captura de los niveles de potencia RSSI para obtener la estimación de la posición del móvil, presenta muchas dificultades ya que hay muchos aspectos que introducen error como la distancia, las paredes y muros, el medio, o incluso el propio cuerpo humano, cuya composición (mayoritariamente agua) modifica notable e impredeciblemente los patrones de radiación. Se hace muy difícil por tanto manejar tal sistema dinámico sin disponer de fuentes de información adicionales. En este Trabajo se propone una mejora en la estimación de la posición basada en incorporar información métrica y de conectividad del entorno en el que el ILS se implementa: habitaciones, pasillos, posición de puertas o interconexión de habitaciones, etc. Tal información se resume en la estructura de datos denominada Grafo de Descripción Métrica, MDG (Metric Description Graph).

Esta propuesta incorpora información métrica y de conectividad entre los recintos de un determinado entorno. Mediante el uso de la información del grafo, se impide que el móvil se sitúe en zonas en las que por unas razones u otras es muy difícil o incluso imposible que se encuentre, como por ejemplo, encima de mesas, dentro de paredes, o fuera de edificios, figura 5.12. Es decir, verifica que la estimación de posición del móvil sea en posiciones literalmente posibles, figura



Figura 5.12: Ejemplo de posiciones del móvil poco probables o imposibles en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico



Figura 5.13: Ejemplo de posiciones del móvil posibles en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

5.13. También se limita el movimiento o trayectoria del móvil en un pasillo al centro de este en lugar de fijarla en un lateral y el paso de una habitación a otra por las puertas en lugar de atravesando paredes o muros, figura 5.14.

El MDG no permite el posicionamiento en todos los puntos posibles del mapa, sino que se limita la posición o movimiento del peatón o móvil a las posiciones correspondientes al grafo, esto es, al centro de pasillos o habitaciones, paso a través de puertas, etc. En definitiva, el MDG codifica las posibles rutas que un peatón puede recorrer en el recinto descrito, figura 5.15.

Para aumentar la usabilidad de esta propuesta, se está trabajando en el diseño de un sistema automático de generación de rutas, partiendo de la propuesta de [Gua11]. A partir de estos trabajos, se consigue generar a partir de mapas en formato XML el grafo de conectividad entre los puntos del mapa y el grafo de descripción métrica del entorno, figura 5.16.

Este sistema automático de generación de rutas no se limita solo al área seleccionada en

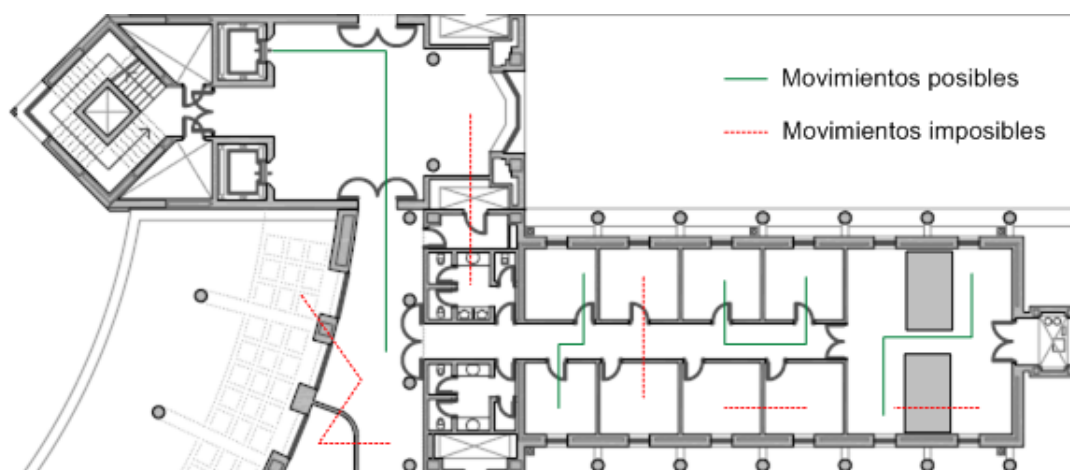


Figura 5.14: Movimientos del móvil en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

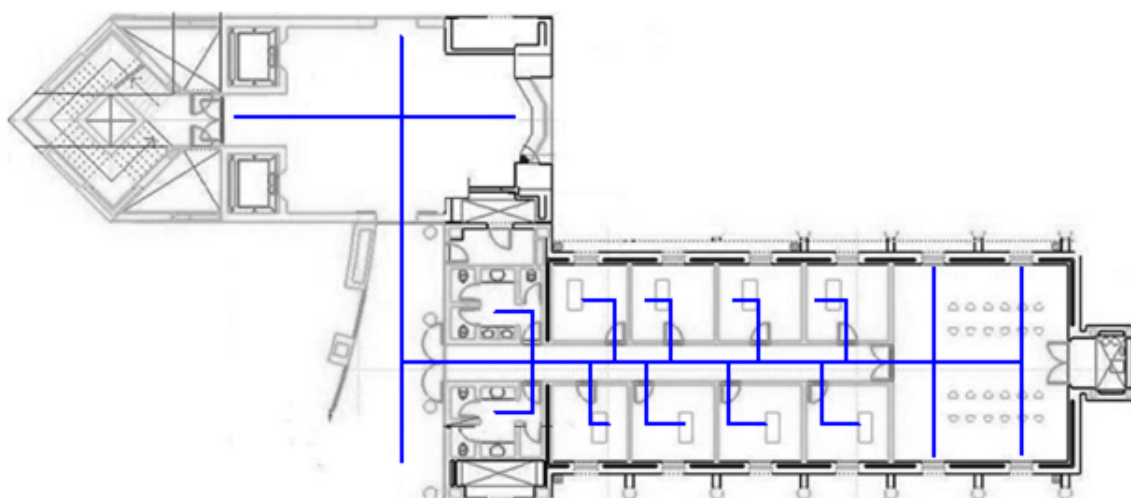


Figura 5.15: Grafo de Descripción Métrica, MDG, en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

este Trabajo Fin de Grado sino que su objetivo es generar de forma automática el grafo de descripción métrica de cualquier mapa. Actualmente se trabaja en la codificación completa del Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá con una superficie de unos 2500 m^2 formada por multitud de pasillos, despachos, laboratorios y aulas, figura 5.17.

Una vez explicado en que consiste el MDG y como se obtiene, es el momento de indicar cómo se utiliza para mejorar la estimación de la posición del móvil. En la figura 5.18 se puede observar el diagrama de flujo básico del algoritmo de ajuste del posicionamiento al MDG. Partiendo de la posición estimada por el algoritmo de localización, se comprueba la posición del grafo de rutas (MDG) que se sitúa más cercana a dicha posición estimada, una vez localizada se ajusta la estimación del móvil a esa posición del MDG, como se muestra en la figura 5.19.

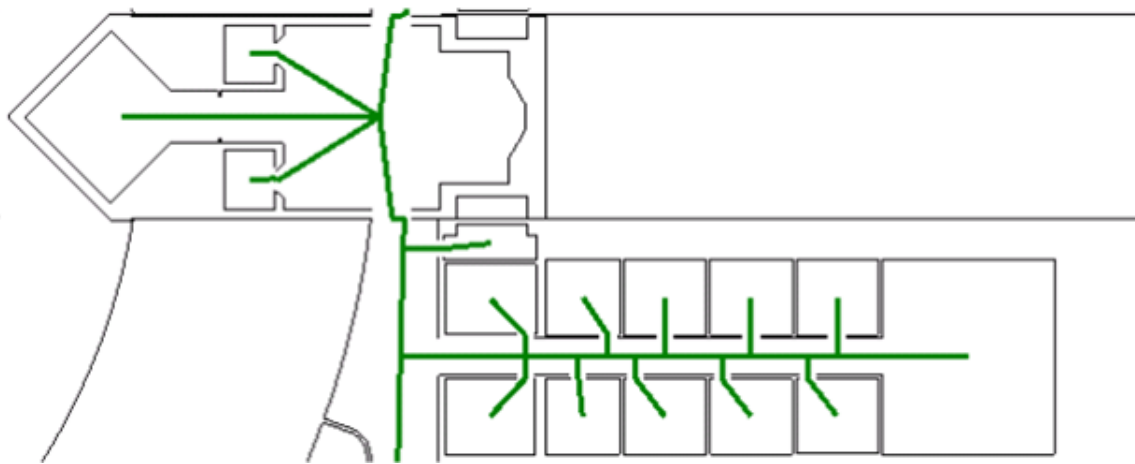


Figura 5.16: Grafo de Descripción Métrica generado automáticamente a partir de mapas en formato XML, 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico

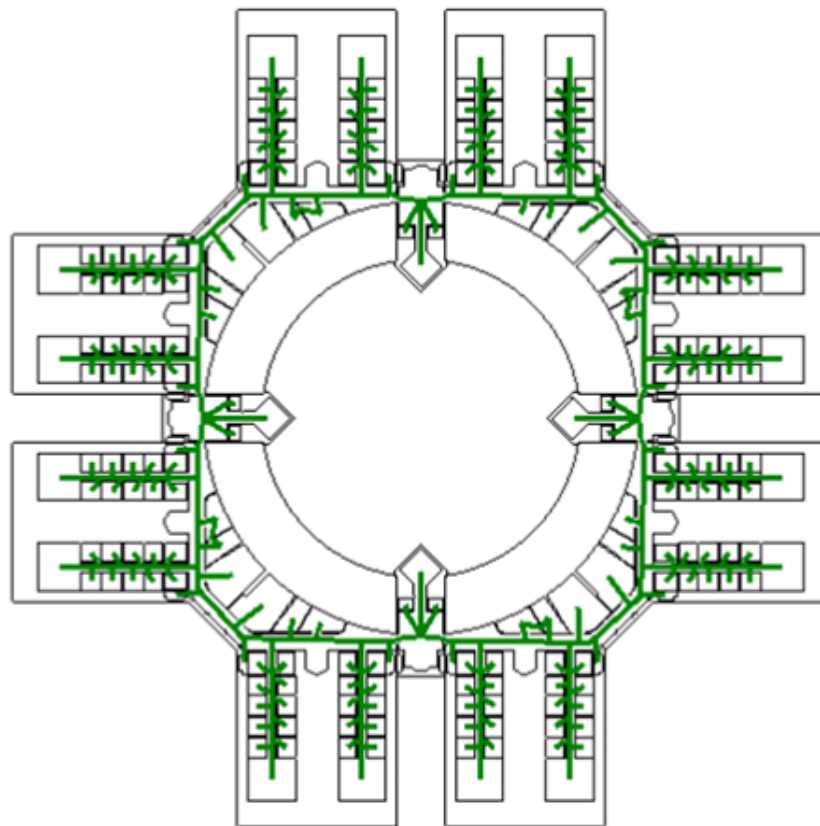


Figura 5.17: Grafo de Descripción Métrica generado automáticamente a partir de mapas en formato XML, 3ª planta completa del Edificio Politécnico

Como se lleva indicando en todo este Trabajo la estimación de posición se basa en los niveles de potencia RSSI recibidos por el nodo móvil, que en ocasiones son muy variables e inestables, lo que provoca que la estimación de la posición del móvil pueda distar mucho de la posición real en la que se encuentra, como se puede observar en la figura 5.19. En dicha figura, se observa como entre estimaciones de posición consecutivas, en este caso, la distancia recorrida previsiblemente sobrepasa la distancia máxima que habría podido recorrer el móvil en función de su velocidad

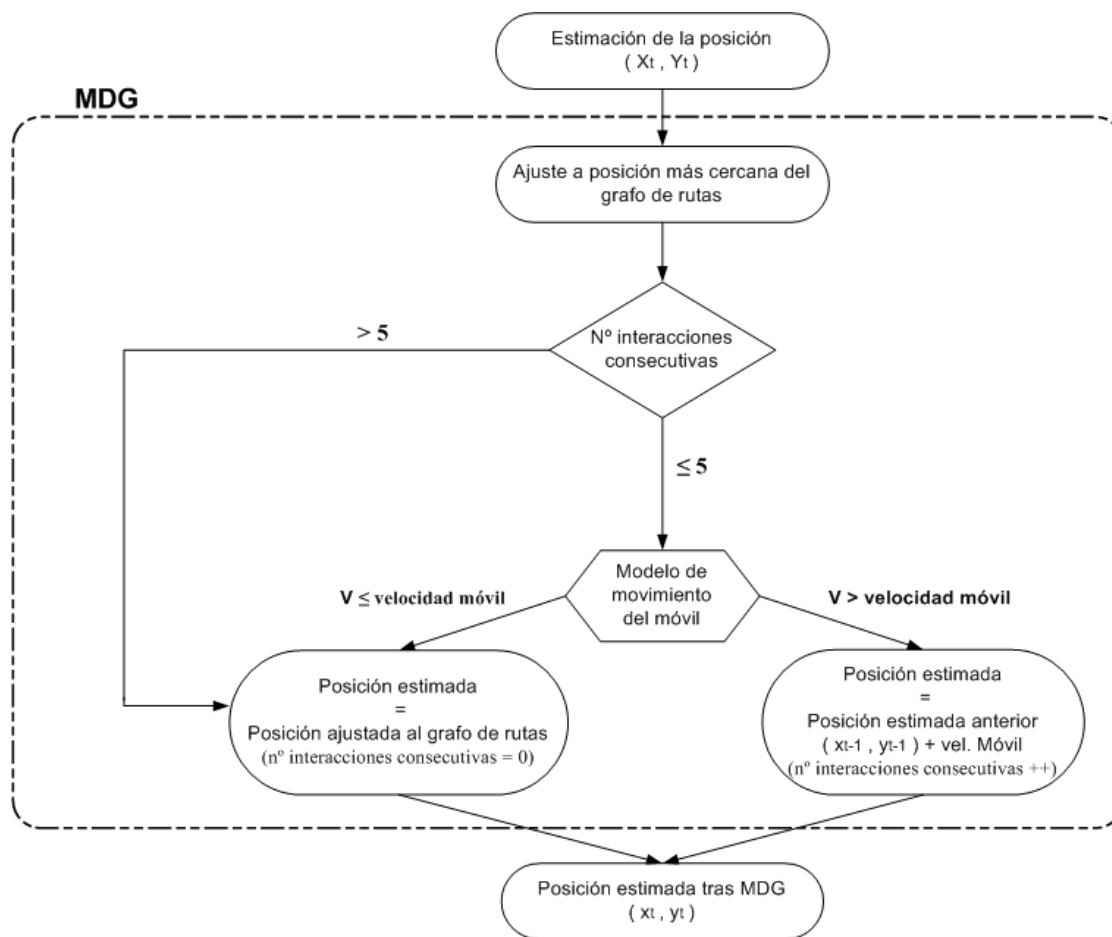


Figura 5.18: Diagrama de flujo del MDG

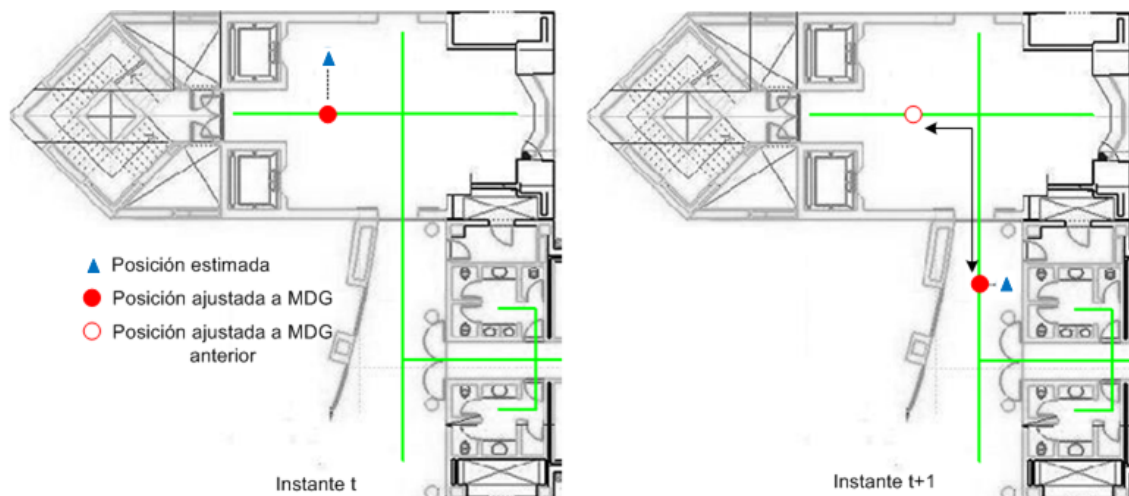


Figura 5.19: Esquema gráfico de funcionamiento del MDG sin modelo de movimiento

máxima en ese espacio de tiempo. Por tanto, sería de gran ayuda tener en cuenta la posición estimada anterior para no incurrir en un grave error a la hora de ajustar la posición del móvil al MDG.

Para tener en cuenta la posición estimada anterior del móvil, se ha añadido a los grafos de descripción métrica (MDG) un modelo de movimiento en función de la velocidad del móvil. Por ejemplo, si el móvil fuera un peatón, las estimaciones de posición consecutivas no deben diferir más de 1.25 m/s (velocidad media de una persona caminando alrededor de 5 Km/h). Es decir, si por ejemplo la red RF ZigBee creada es capaz de proporcionar estimaciones de posición cada 1.5 segundos, el móvil en ese espacio de tiempo solo puede haber recorrido 2 metros. En la figura 5.20 se observa gráficamente la actuación del ajuste a rutas, Metric Description Graph MDG, más un modelo de movimiento en función de la velocidad del móvil.

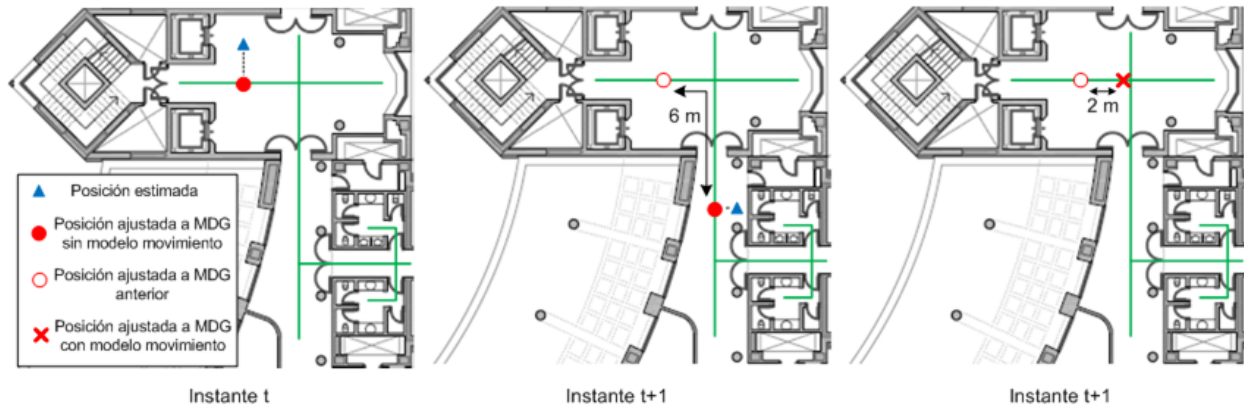


Figura 5.20: Esquema gráfico de funcionamiento del MDG con modelo de movimiento

En la figura 5.21, se muestra un ejemplo de funcionamiento completo del MDG (ajuste a grafo de descripción métrica con modelo de movimiento del móvil), utilizando la herramienta Matlab. Para ello se ha implementado con la herramienta Matlab la función $[xMDG, yMDG] = \text{funcion MDG}(xMDG_{\text{anterior}}, yMDG_{\text{anterior}}, X_{\text{estimada}}, Y_{\text{estimada}})$ que tiene como parámetros de entrada la posición estimada en el instante actual y la posición estimada MDG en el instante anterior, y devuelve la posición filtrada tras el MDG.

En dicha figura 5.21 se puede observar que en el instante 't' se estima la posición del móvil en una zona muy cercana al grafo de rutas (MDG) por lo que es muy fácil ver como se ajusta la posición estimada a dicho grafo de rutas. También en este instante 't' se puede apreciar como en el siguiente movimiento el móvil tendrá una limitación en el espacio que podrá recorrer ya que se incluye el modelo de movimiento en función de la velocidad del móvil.

Seguidamente en el instante 't+1' se puede apreciar como la estimación de posición del móvil se separa más de la limitación de movimiento en función de la posición anterior del móvil y por tanto, entra en actuación la limitación de movimiento. Por ultimo, en el instante 't+2' es más clara la actuación del MDG más el modelo de movimiento, en este caso el paseo o ruta discurre por el pasillo y en ese instante, se estima la posición del móvil en una habitación lateral. Debido a que la distancia para entrar en esa habitación (pasando por la puerta) desde el pasillo es excesiva, se vuelve a limitar el movimiento del móvil a la distancia máxima que habría podido recorrer el móvil en ese espacio de tiempo entre medidas consecutivas.

También indicar que si durante cinco interacciones consecutivas ha actuado siempre el MDG con el modelo de movimiento sobre la estimación de posición, este se resetea, es decir, en la sexta

muestra consecutiva ya no se tendría en cuenta el MDG con la estimación de posición anterior. Este factor, en este caso 5, podría modificarse en función de las necesidades o características del entorno. La posición del móvil se ajustaría directamente a la posición más cercana al grafo de descripción métrica del entorno. Este paso se realiza para evitar que una secuencia de errores esporádicos en la estimación de la posición nos lleve a una posición en el MDG muy apartada de la ubicación real del móvil; una situación típica sería aquella en la que el portador del nodo móvil se moviese a una velocidad mayor que la cota dada (por ejemplo: en carrera). Resetear el filtrado de movimiento es la única solución en este caso y otros de similares efectos (bifurcaciones, etc.).

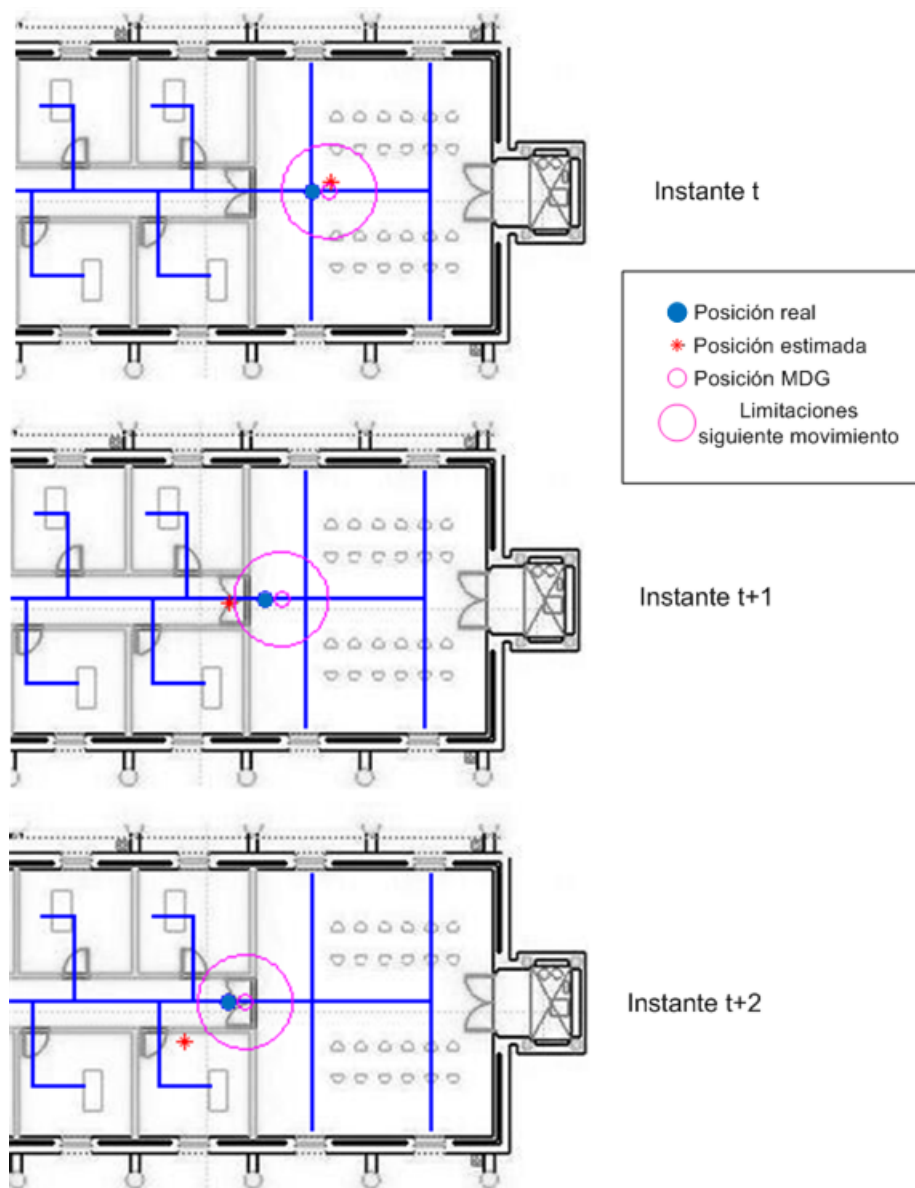


Figura 5.21: Ejemplo práctico de la función MDG desarrollada en Matlab

Capítulo 6

Pruebas Experimentales

6.1. Introducción

En este capítulo se muestran diferentes resultados obtenidos mediante la red RF ZigBee diseñada e implementada en la tercera planta (Departamento de Electrónica) del Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá según el esquema propuesto en capítulos anteriores, figura 6.1.

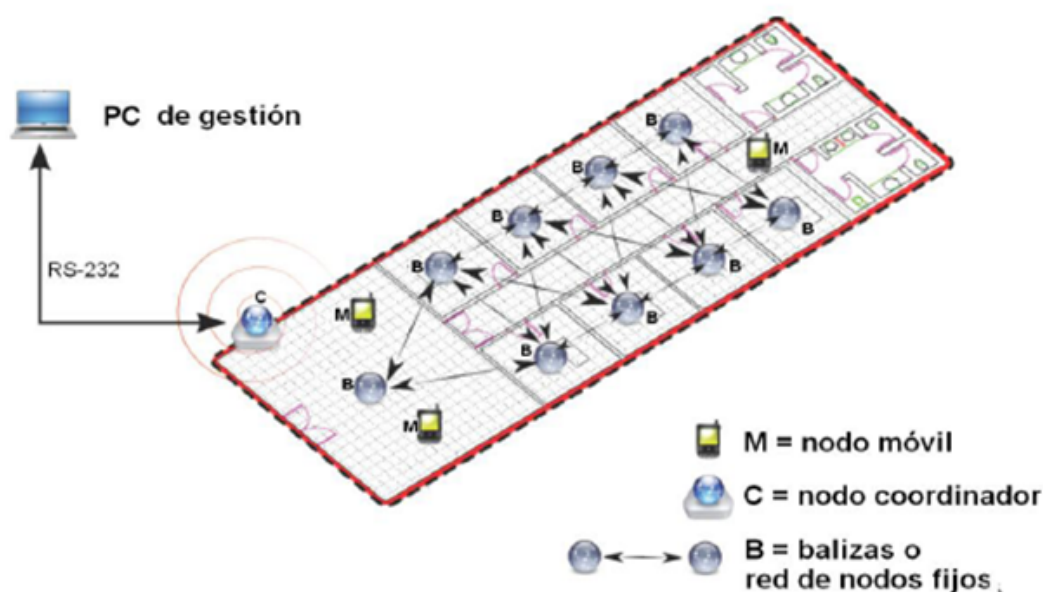


Figura 6.1: Esquema de la estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá

El capítulo se dividirá en secciones correspondientes con las pruebas experimentales que se han realizado siguiendo rutas diferentes, es decir, en cada prueba variará el entorno por el cual se desplaza el móvil. Como se ha visto en capítulos anteriores, el entorno del que se dispone es muy variado con pasillos estrechos, zonas abiertas, laboratorios y despachos, figura 6.2. Por ello, se pueden realizar multitud de pruebas para comprobar el funcionamiento y las prestaciones del ILS basado en la red RF ZigBee diseñada.

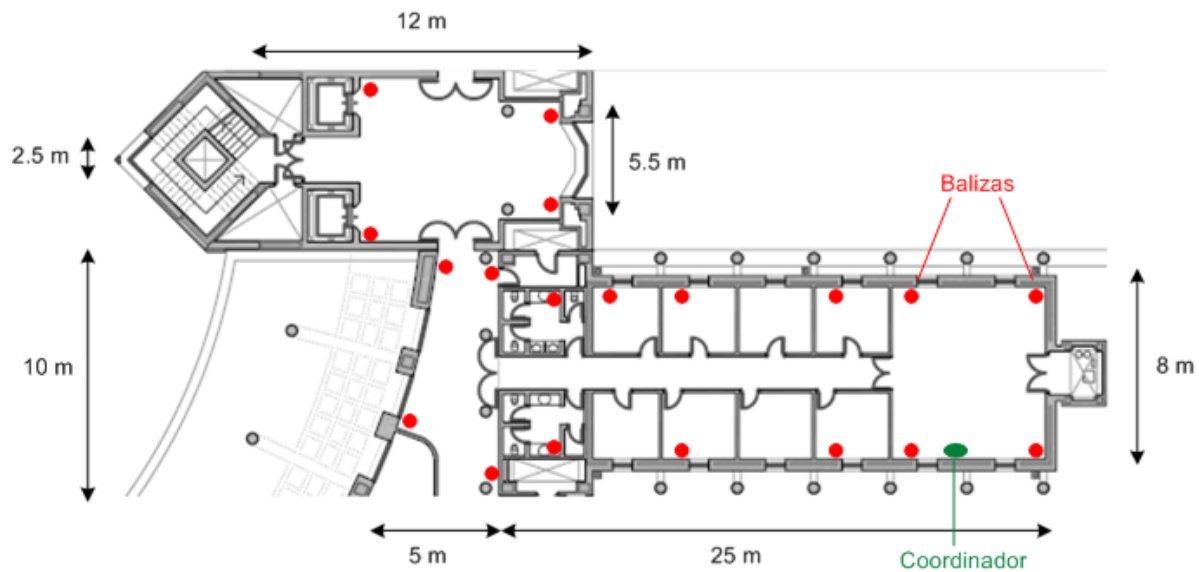


Figura 6.2: Plano de la estructura RF propuesta en la 3ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá

En estas pruebas se comprueban experimentalmente los algoritmos de localización descritos en este Trabajo. La estimación de la posición del móvil se determina mediante alguno de los dos algoritmos referenciados en este trabajo: el algoritmo *Location Engine (LE)* o el denominado *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB)* descritos en el capítulo anterior. Finalmente, en cada estimación de posición se puede añadir el ajuste a grafos de descripción métrica del entorno descrito también en el capítulo anterior; un diagrama resumen de las cuatro alternativas estudiadas en las pruebas experimentales, se muestra en la figura 6.3.

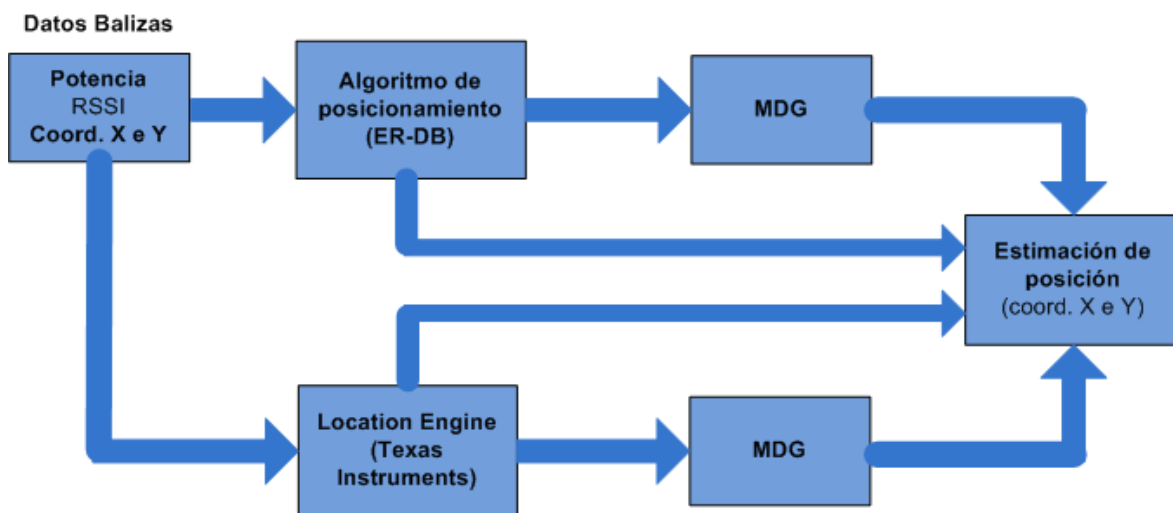


Figura 6.3: Diagrama de bloques de las pruebas realizadas

Los cuatro métodos de estimación de posición estudiados son:

- *Location Engine (LE)*: Algoritmo de estimación de la posición del fabricante Texas Instruments.

- *Location Engine + MDG (LE+MDG)*: Algoritmo de estimación LE más ajuste a grafos de descripción métrica (MDG).
- *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de balizado (ER+DB)*: Algoritmo de estimación de la posición implementado en este Trabajo Fin de Grado.
- *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de balizado + MDG*: Algoritmo de estimación de la posición implementado en este Trabajo Fin de Grado más ajuste a grafos de descripción métrica, (ER+DB+MDG).

Se realizarán en este capítulo diferentes pruebas para comprobar los resultados en la estimación de la posición mediante las técnicas descritas en el capítulo anterior y para comprobar el funcionamiento de la propuesta de ajuste a grafos de descripción métrica con un modelo de movimiento del móvil (MDG), primeramente mejorando la estimación de Location Engine y seguidamente comprobando su funcionamiento en el algoritmo propuesto en este Trabajo Fin de Grado como sustitución al algoritmo utilizado por Texas Instruments, que se ha denominado Multilateración con Ejes Radicales más Evaluación de Disparidad de Balizado.

De entre las distintas pruebas experimentales realizadas para la verificación del sistema en las siguientes secciones se muestran los resultados de las más significativas, a saber:

- *Prueba Experimental 1*: prueba por pasillo y despachos, ruta por pasillo O31 y despachos O31.
- *Prueba Experimental 2*: prueba espacios abiertos, ruta por las zonas amplias del entorno (hall de pasillo O31 y hall de ascensores).
- *Prueba Experimental 3*: prueba 2D5 por planta 2ª y 3ª del Departamento de Electrónica.
- *Prueba Experimental 4*: prueba de los algoritmos de localización a partir de los datos obtenidos en el simulador de red RF ZigBee.

6.2. Resultados pruebas experimentales

6.2.1. Prueba Experimental 1: ruta de complejidad media

En esta primera prueba experimental, se realiza un recorrido por parte del móvil saliendo del laboratorio O31, recorriendo el pasillo O31 e introduciéndose en los baños, por último, regresará al laboratorio O31 por el mismo camino como se muestra en la figura 6.4.

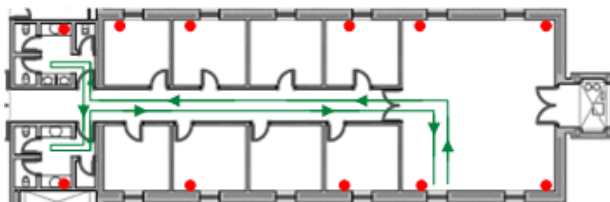


Figura 6.4: Recorrido prueba experimental 1

En esta prueba experimental inicial, se muestran las diferencias entre el algoritmo *Location Engine (LE)* y Location Engine añadiendo a la estimación el ajuste a rutas MDG. También se muestran los resultados de estimación de la posición haciendo uso del algoritmo diseñado en este Trabajo Fin de Grado, denominado *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB)* incluyendo también el ajuste a rutas MDG.

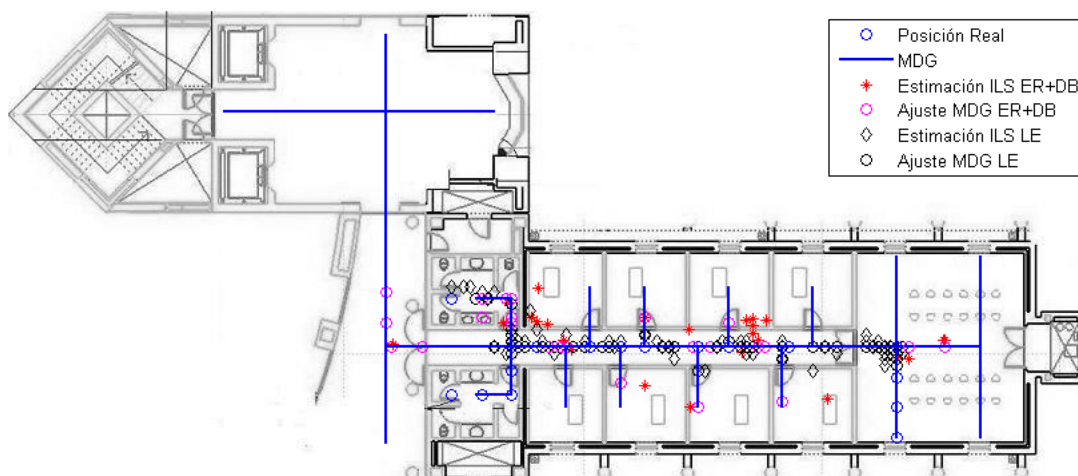


Figura 6.5: Resultados prueba experimental 1

	Location Engine	Location Engine + MDG	ER+DB	ER+DB + MDG
Error medio	3.8 m	3.5 m	3.8 m	3.75m

Tabla 6.1: Información de Error medio en la prueba experimental 1

Primeramente se mostrarán los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento Location Engine con la mejora que se propone en este Trabajo Fin de Grado, MDG. Como se puede observar en la tabla 6.1, que muestra los errores entre la posición real del móvil y la

posición estimada por cada uno de los algoritmos de localización utilizados, se obtiene un error medio de 3.8 m para Location Engine y aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), se reduce el error medio a 3.5 m , es decir, se reduce el error medio en un 8% .

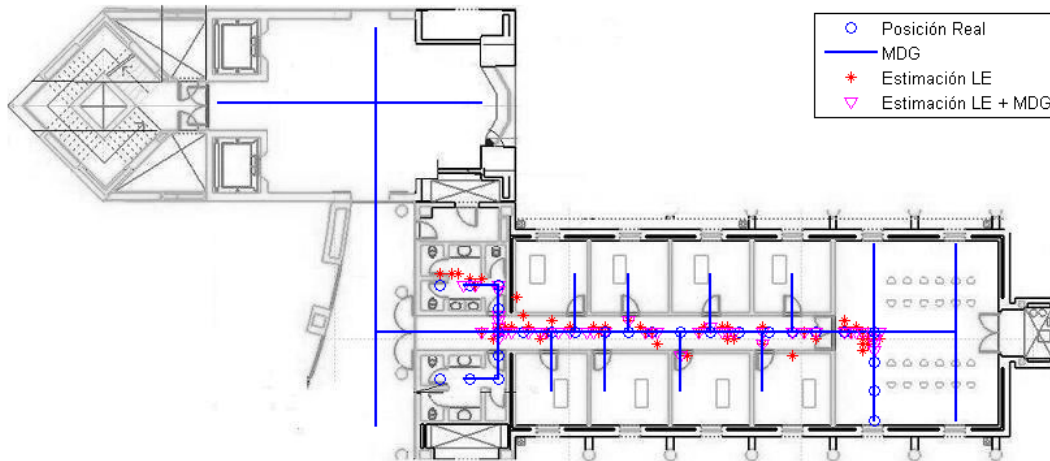


Figura 6.6: Resultados prueba experimental 1, LE vs LE+MDG

En figura 6.7 se muestran diferentes formas de observar las diferencias en el error de localización entre Location Engine y Location Engine más el MDG diseñado, error de localización y error acumulativo.

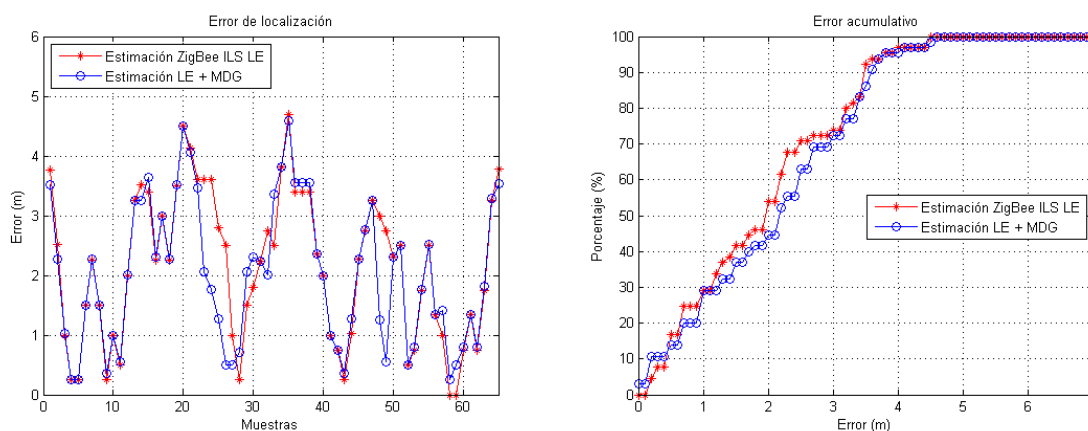


Figura 6.7: Errores entre LE y LE+MDG

Otra método de comprobar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.8 la utilización del MDG limita la velocidad del móvil por lo que se corrigen posibles saltos o cambios bruscos en la estimación de la posición. En esta prueba experimental el resultado es similar y no se consiguen mejoras utilizando el MDG, en pruebas posteriores, si se producen

cambios bruscos en la estimación se comprobará como mejora la estimación de habitación.

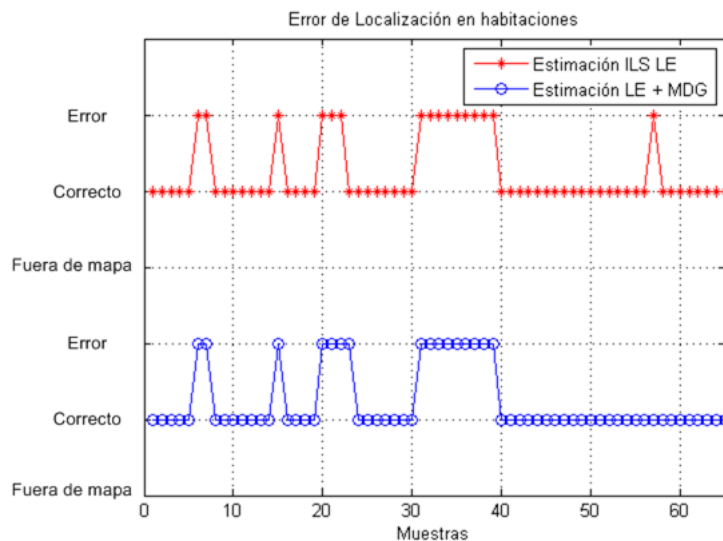


Figura 6.8: Error de habitación utilizando LE y LE+MDG

Seguidamente se mostrarán los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento diseñado denominado Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB) incluyendo también la mejora propuesta denominada MDG. Como se puede observar en la tabla 6.1, se obtiene un error medio de 3.8 m para algoritmo diseñado frente a 3.75 m aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), por lo tanto en esta prueba el error medio no se reduce prácticamente.

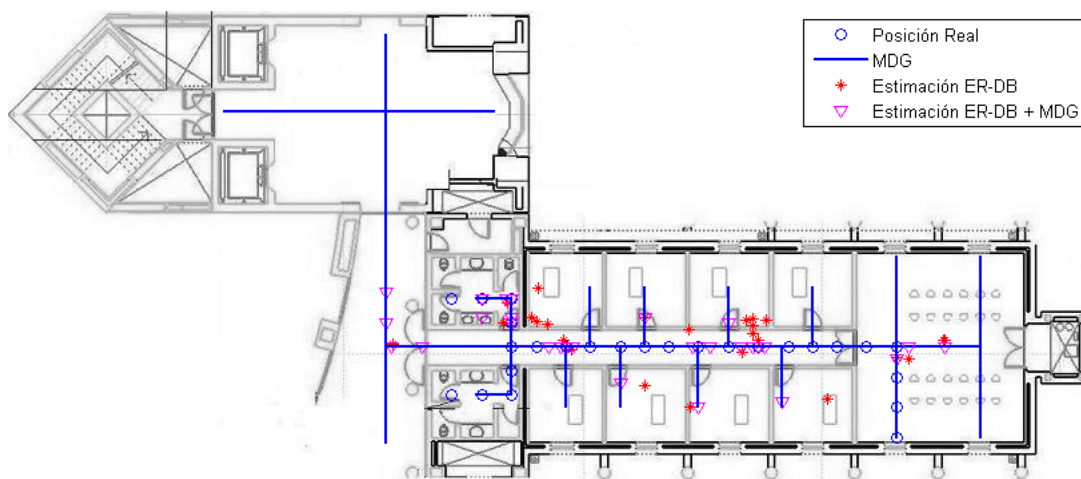


Figura 6.9: Resultados prueba experimental 1, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG

En figura 6.10 se muestran diferentes formas de observar las diferencias en el error de localización entre Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado y

Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado más el MDG diseñado.

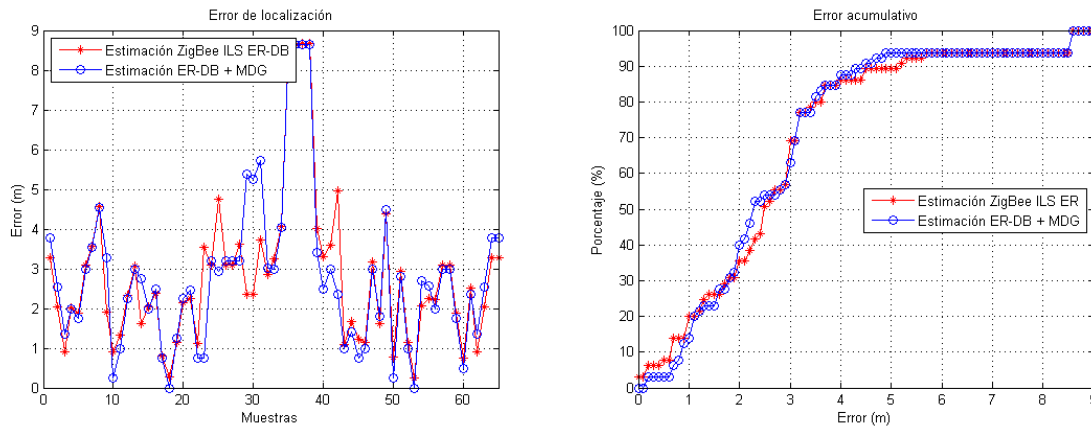


Figura 6.10: Errores entre ER-DB y ER-DB+MDG

Como se va a indicar en todo este capítulo de resultados, otra forma de verificar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.11 la utilización del MDG limita la velocidad del móvil por lo que se corrigen posibles saltos o cambios bruscos en la estimación de la posición. Utilizando el MDG se reduce el error de habitación en un 20 %.

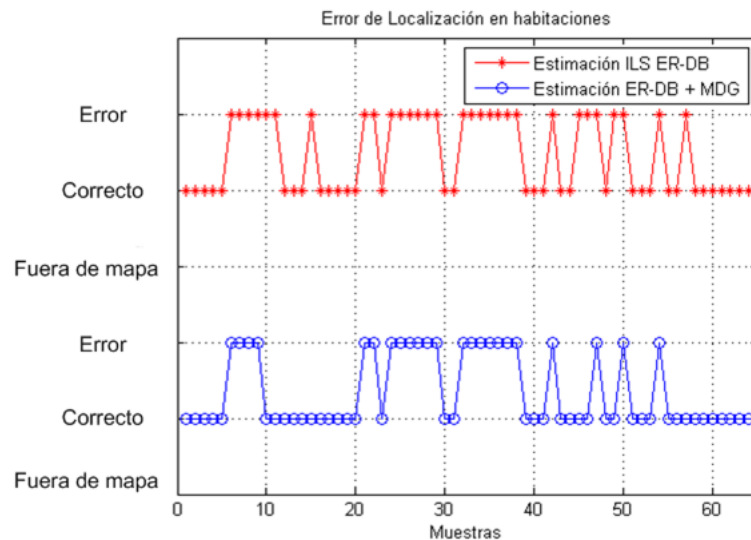


Figura 6.11: Error de habitación utilizando ER-DB y ER-DB+MDG

Por ultimo, un aspecto interesante es observar las diferencias entre el algoritmo por el fabricante Texas Instruments, *Location Engine*, y el algoritmo completo diseñado en este Trabajo Fin de Grado, *Multilateración de Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado y ajuste a Grafos de Descripción Métrica (ER-DB+MDG)*. Según los resultados de la tabla 6.1, se obtiene un error medio de 3.8 m para *Location Engine* y aplicando el algoritmo completo propuesto, se reduce el error medio a 3.75 m , es decir, no se reduce el error medio pero se consigue

un algoritmo propio con estimaciones similares a las de *Location Engine* de Texas Instruments.

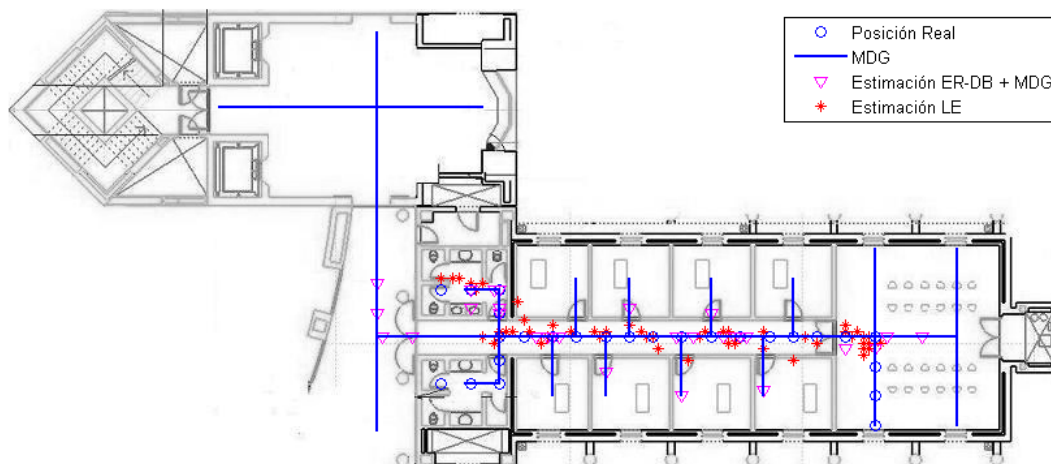


Figura 6.12: Resultados prueba experimental 1, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG

En figura 6.13 se muestran diferentes formas de observar las diferencias en el error de localización entre Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado más el MDG diseñado.

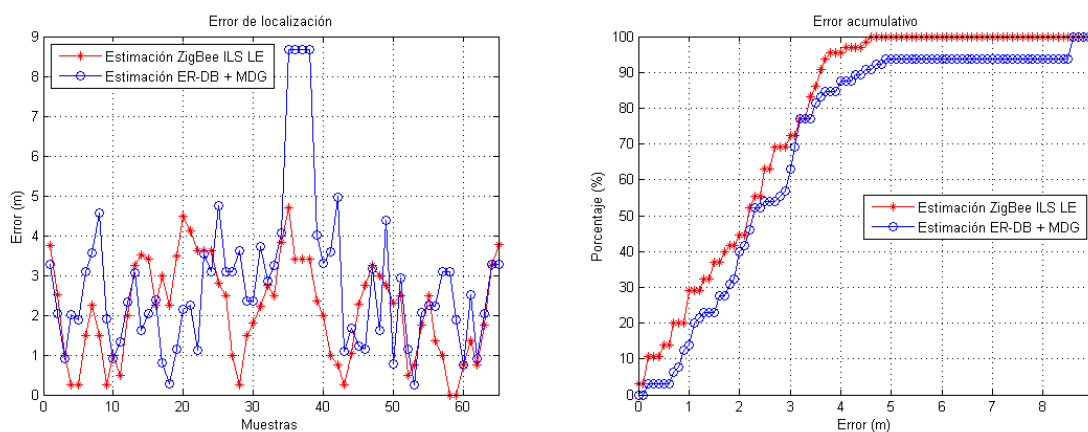


Figura 6.13: Errores entre LE y ER-DB+MDG

Para terminar otra forma de verificar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.14 la utilización del MDG limita la velocidad del móvil por lo que se corrigen posibles saltos o cambios bruscos en la estimación de la posición. Utilizando todo el algoritmo propuesto se aumenta el error de habitación en un 30 % con respecto a Location Engine.

De esta primera prueba experimental se puede decir que la propuesta MDG mejora las es-

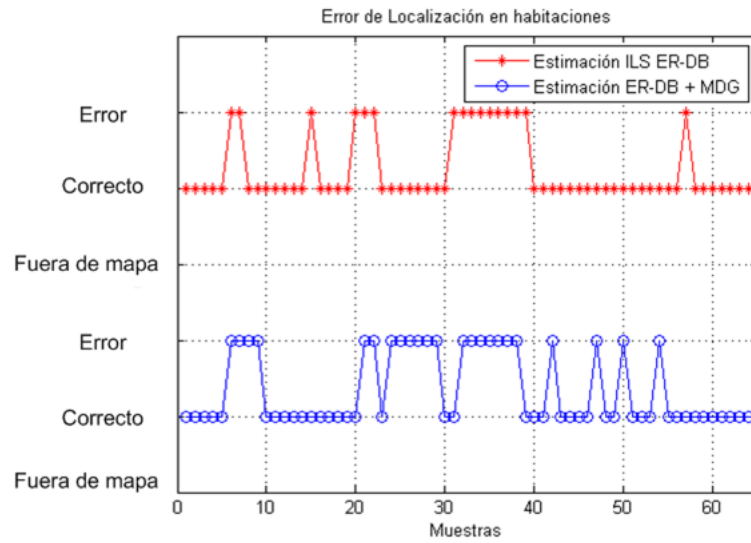


Figura 6.14: Error de habitación utilizando LE y ER-DB+MDG

timaciones de posición proporcionadas por Location Engine considerablemente. Por otro lado, indicar que el algoritmo completo propuesto en este Trabajo Fin de Grado ER-DB+MDG *Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado* más ajuste a Grafos de Descripción Métrica consigue estimaciones de posición del móvil similares a *Location Engine*.

6.2.2. Prueba Experimental 2: espacios abiertos

En esta segunda prueba experimental, se realiza un recorrido por parte del móvil por las zonas abiertas del mapa, hall de pasillo y hall de ascensores como se muestra en la figura 6.15.



Figura 6.15: Recorrido prueba experimental 2

Como se ha realizado en los resultados de la primera prueba, se muestran las diferencias entre el algoritmo *Location Engine (LE)* y Location Engine añadiendo a la estimación el ajuste a rutas MDG. También se muestran los resultados de estimación de la posición haciendo uso del algoritmo diseñado en este Trabajo, denominado *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB)* incluyendo también el ajuste a rutas MDG.

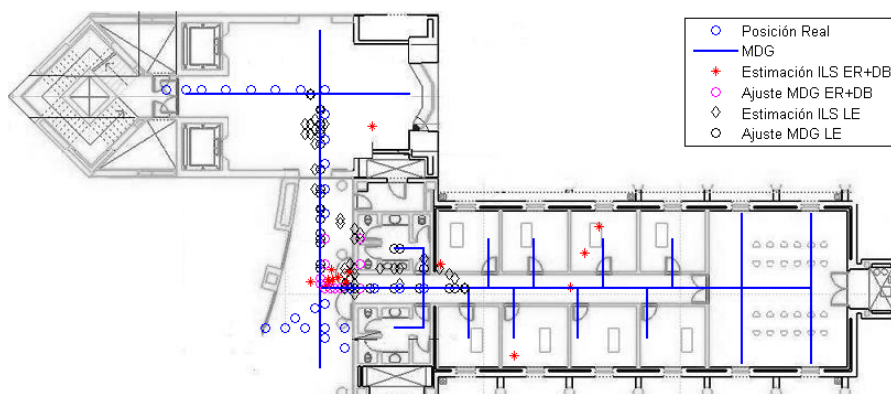


Figura 6.16: Resultados prueba experimental 2

	Location Engine	Location Engine + MDG	ER+DB	ER+DB + MDG
Error medio	3.9 m	3.2 m	9.5 m	5.5m

Tabla 6.2: Información de Error medio en la prueba experimental 2

Inicialmente se mostrarán los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento Location Engine con la mejora que se propone en este Trabajo Fin de Grado, MDG. Como se puede observar en la tabla 6.2, que muestra los errores entre la posición real del móvil y la

posición estimada por cada uno de los algoritmos de localización utilizados, se obtiene un error medio de 3.9 m para Location Engine y aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), se reduce el error medio a 3.2 m , es decir, se reduce el error medio en un 18 %.



Figura 6.17: Resultados prueba experimental 2, LE vs LE+MDG

En figura 6.18 se muestran diferentes formas de observar las diferencias en el error de localización entre Location Engine y Location Engine más el MDG diseñado, error de localización y error acumulativo.

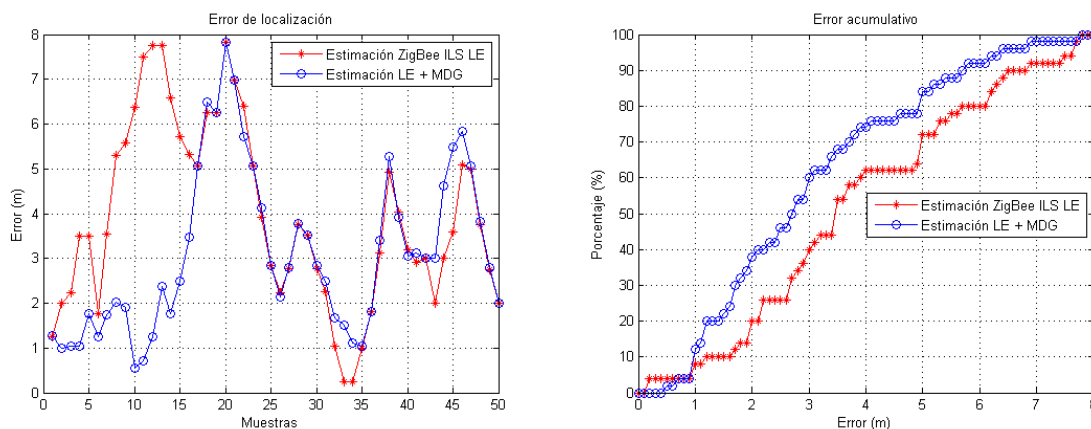


Figura 6.18: Errores entre LE y LE+MDG

Como se ha indicado en la prueba experimental anterior, otra forma de verificar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.19, la utilización del MDG limita la velocidad del móvil por lo que se corrigen posibles saltos o cambios bruscos en la estimación de la posición. En esta prueba experimental el resultado es que el MDG mejora la estimación de

habitación en un 50 %.

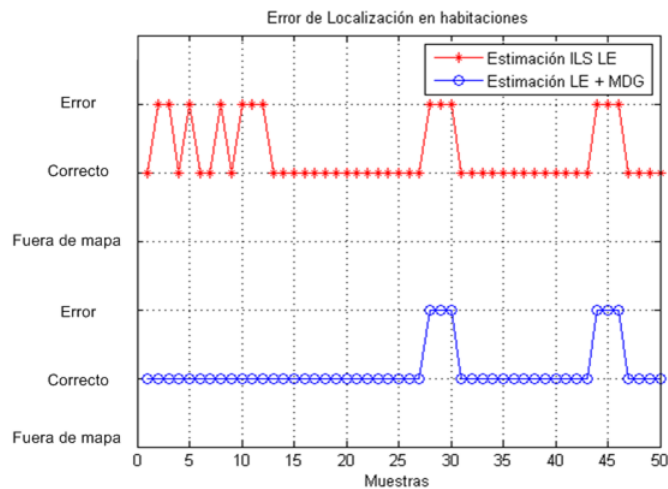


Figura 6.19: Error de habitación utilizando LE y LE+MDG

A continuación se muestran los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento diseñado denominado Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB) incluyendo también la mejora propuesta denominada MDG. Como se puede observar en la tabla 6.2, se obtiene un error medio de 10 m para algoritmo diseñado frente a 5.5 m aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), por lo tanto en esta prueba el error medio se reduce en más de un 40 %.

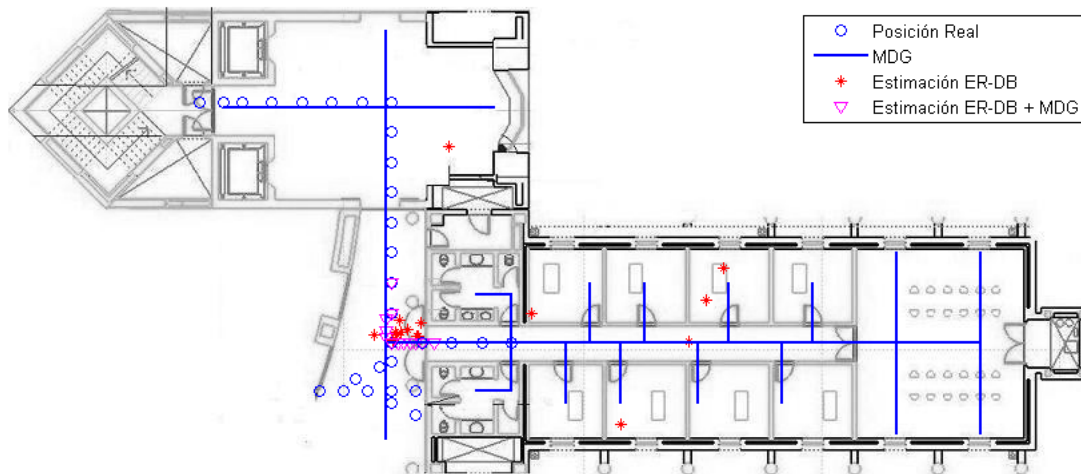


Figura 6.20: Resultados prueba experimental 2, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG

En figura 6.21 se muestran diferentes formas de observar el error de localización entre Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado y Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado más el MDG diseñado.

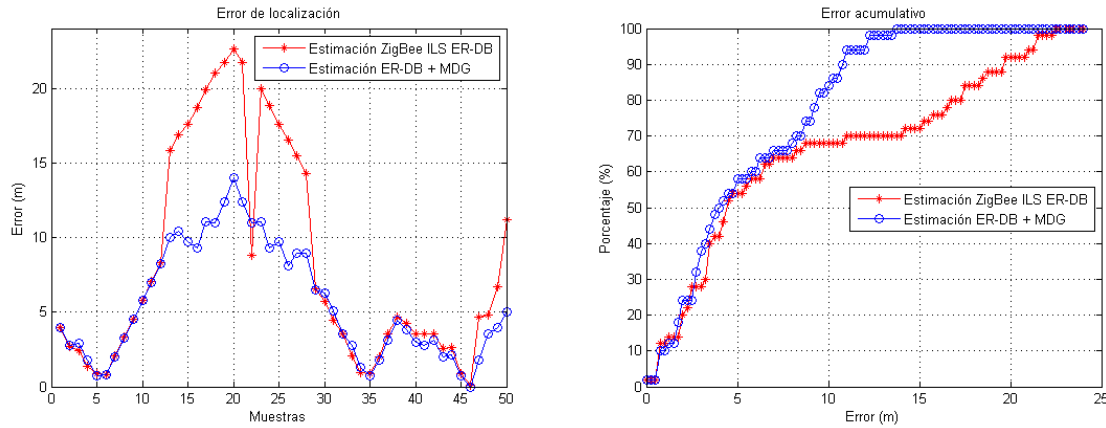


Figura 6.21: Errores entre ER-DB y ER-DB+MDG

Por terminar este apartado como se a indicado en los resultados de la primera prueba, otra forma de verificar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.22, la utilización del MDG limita la velocidad del móvil por lo que se corrigen posibles saltos o cambios bruscos en la estimación de la posición. Utilizando el MDG se reduce el error de habitación en un 10 %.

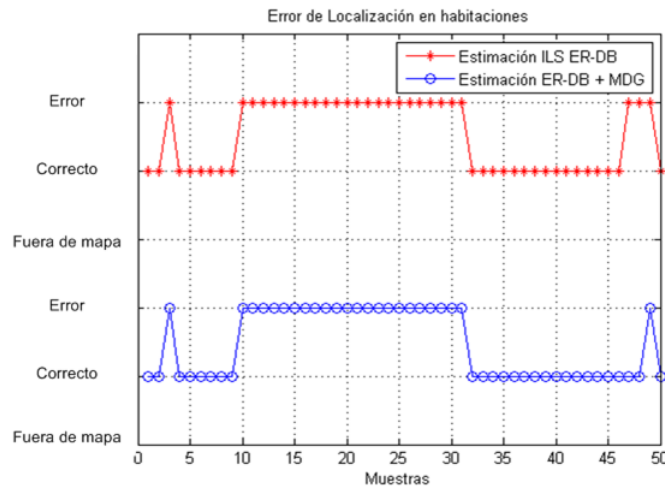


Figura 6.22: Error de habitación utilizando ER-DB y ER-DB+MDG

Para terminar, en esta prueba experimental se hace hincapié en un aspecto interesante, como es observar las diferencias entre el algoritmo propio del fabricante Texas Instruments, *Location Engine*, y el algoritmo completo diseñado en este Trabajo Fin de Grado, *Multilateración de Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado y ajuste a Grafos de Descripción Métrica (ER-DB+MDG)*. Según los resultados de la tabla 6.2, se obtiene un error medio de 3.9 m para *Location Engine* y aplicando el algoritmo completo propuesto, en este caso no se produce una mejora ya que el error medio es 5.5 m , es decir, aumenta el error medio pero se consigue un algoritmo propio para sustituir a *Location Engine* de Texas Instruments, pero que en este caso en el cual el recorrido transcurre por espacios abiertos no se consiguen los resultados deseados.

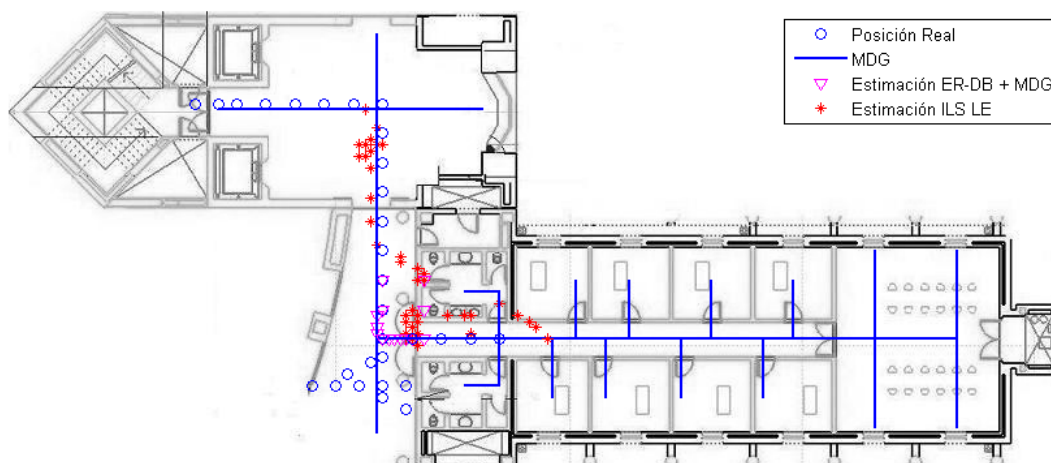


Figura 6.23: Resultados prueba experimental 2, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG

En figura 6.24 se muestran diferentes formas de observar las diferencias en el error de localización entre Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado más el MDG diseñado.

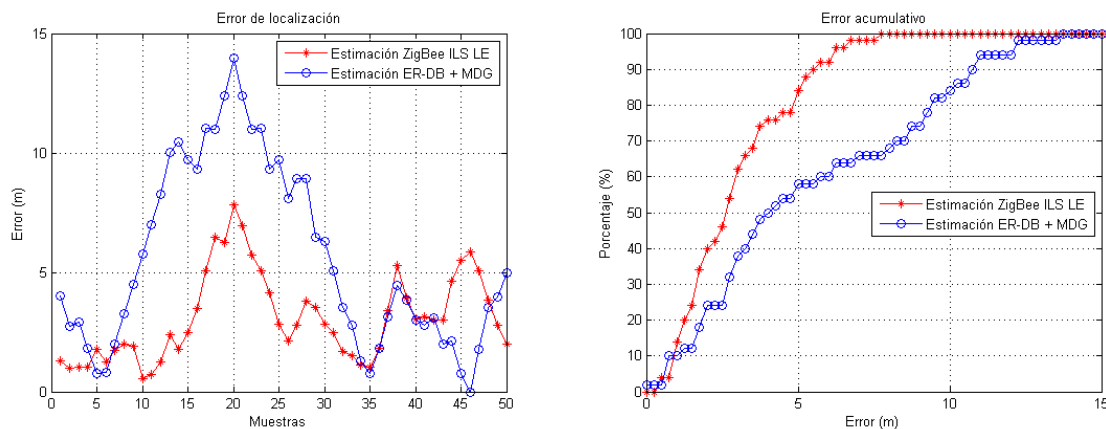


Figura 6.24: Errores entre LE y ER-DB+MDG

Para finalizar, otra forma de verificar el sistema propuesto es observar el error de habitación, es decir, comprobar si se encuentra el móvil en la habitación que se estima. Como se observa en la figura 6.25 utilizando todo el algoritmo propuesto se aumenta el error de habitación en un 40 % con respecto a Location Engine.

De esta segunda prueba experimental se puede decir que la propuesta MDG mejora las estimaciones de posición proporcionadas por Location Engine considerablemente. Por otro lado, indicar que el algoritmo completo propuesto en este Trabajo Fin de Grado ER-DB+MDG, *Mul-*

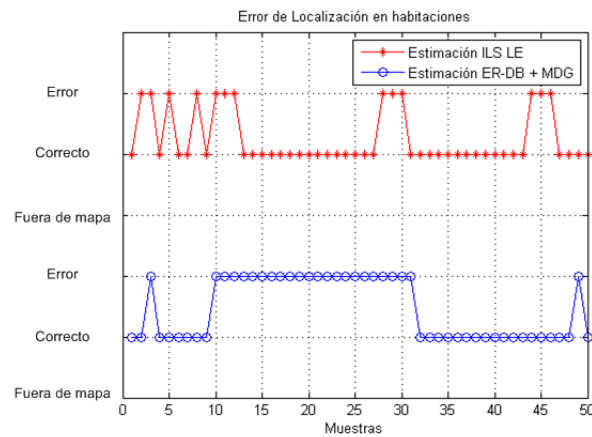


Figura 6.25: Error de habitación utilizando LE y ER-DB+MDG

tilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado más ajuste a Grafos de Descripción Métrica, consigue estimaciones de posición del móvil peores que *Location Engine*.

Debido a que en esta prueba experimental el error en la estimación de la posición del móvil en algunos puntos es especialmente elevado, se van a indicar alguna de las razones por las cuales se ha producido un aumento en el error entre la estimación de la posición y la posición real del móvil. Como se puede apreciar en la figura 6.26 en la muestra 20 (y en las cercanas) del recorrido seguido, se obtiene un error muy elevado tanto con *Location Engine* como con *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado más ajuste a Grafos de Descripción Métrica*, uno de los motivos se debe a que la posición en la cuál se encuentra el móvil esta muy alejada de los nodos de referencia o balizas, y para esta posición en concreto, no hay visión directa entre el nodo móvil y ninguna de los nodos de referencia o balizas. Pero cabe destacar que aunque en esta prueba de espacios abiertos el *Location Engine* realiza estimaciones de posición mejores, se comprueba como la utilización del MDG mejora notablemente la estimación de posición por parte del algoritmo *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado*.

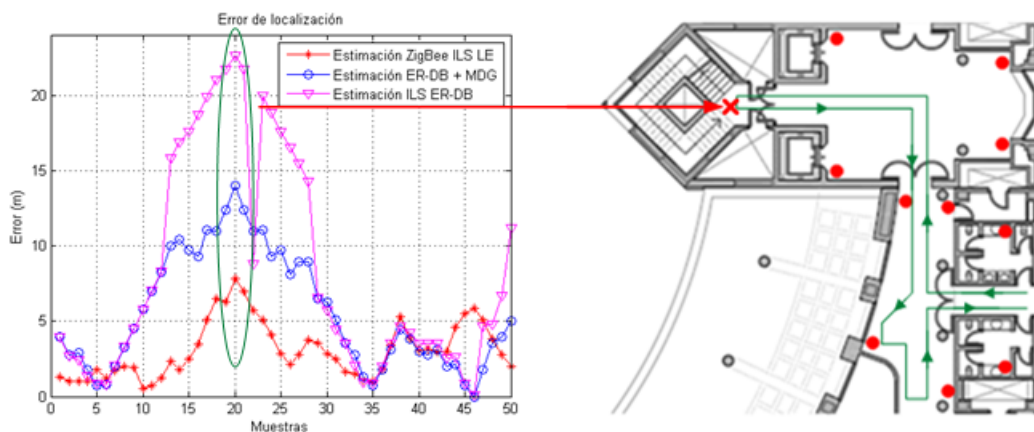


Figura 6.26: Determinación de la posición del móvil con el error más elevado

6.2.3. Prueba Experimental 3: prueba 2D5

Para esta tercera prueba experimental ha sido necesario ampliar, en la 2ª planta del departamento de electrónica, la estructura física del sistema de localización RF propuesta en el capítulo 3.1 de este Trabajo Fin de Grado. Se han añadido una serie de balizas de referencia utilizando el dispositivo SOC BB explicado en el capítulo 4.3.2.2. En la figura 6.27 se muestra un esquema del sistema propuesto en la 2ª planta formado únicamente por balizas de referencia.

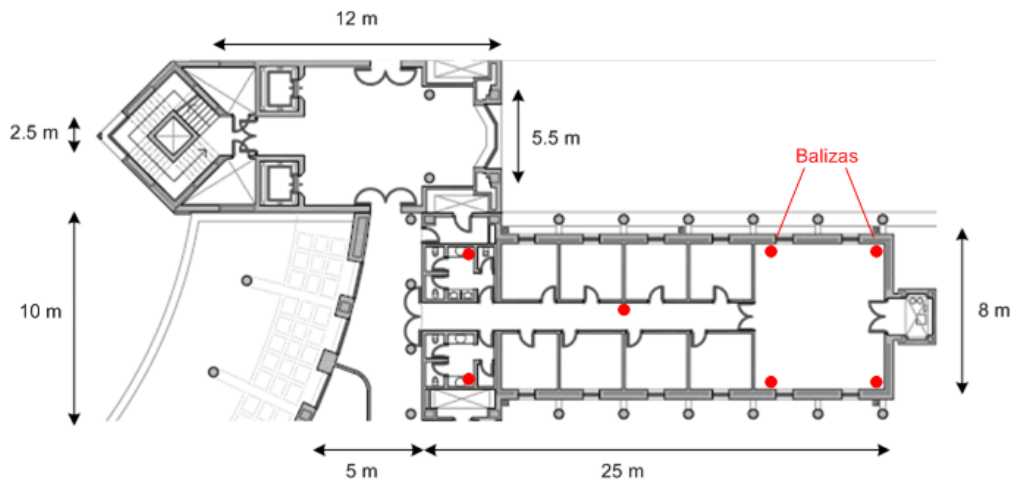


Figura 6.27: Estructura RF propuesta en la 2ª planta del Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico de la Universidad de Alcalá

En esta tercera prueba experimental, se realiza un recorrido por dos plantas del departamento de electrónica (2ª y 3ª planta) para verificar el sistema desarrollado en 2,5 dimensiones (2D5). El móvil parte del laboratorio O21, recorriendo el pasillo O21 e introduciéndose en los baños, seguidamente sube por las escaleras hacia la 3ª planta, recorre el hall O31, pasillo O31, baños y finaliza en el laboratorio O31 como se muestra en la figura 6.28.

Como se ha realizado en las pruebas experimentales anteriores, se muestran las diferencias entre el algoritmo *Location Engine (LE)* y Location Engine añadiendo a la estimación el ajuste a rutas MDG. También se muestran los resultados de estimación de la posición haciendo uso del algoritmo diseñado en este Trabajo Fin de Grado, denominado *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB)* incluyendo también el ajuste a rutas MDG.

	LE	LE + MDG	ER+DB	ER+DB + MDG	Error planta
Error medio (densidad alta)	4.4 m	4.1 m	4.3 m	4.1 m	0 %
Error medio (densidad baja)	8 m	7.9 m	14 m	12 m	20 %

Tabla 6.3: Información de Error medio en la prueba experimental 3

En primer lugar se mostrarán los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento Location Engine con la mejora que se propone en este Trabajo Fin de Grado, MDG. Como se puede observar en la tabla 6.3, que muestra los errores entre la posición real del móvil y la posición estimada por cada uno de los algoritmos de localización utilizados, se obtiene un error medio de 4.4 m para Location Engine y aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), se reduce el error medio a 4.1 m, es decir, se

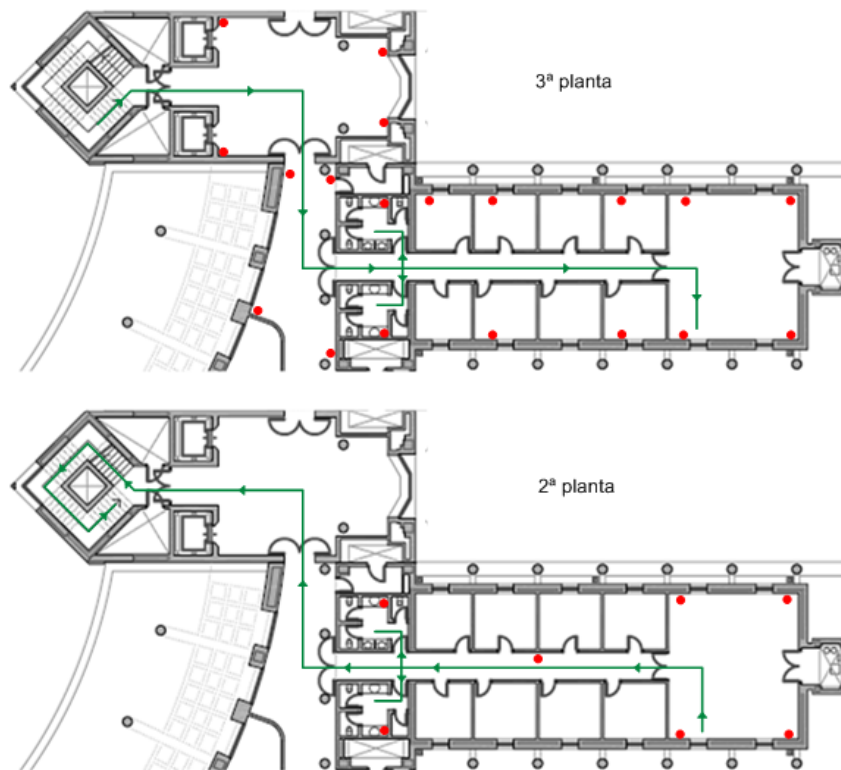


Figura 6.28: Recorrido prueba experimental 3

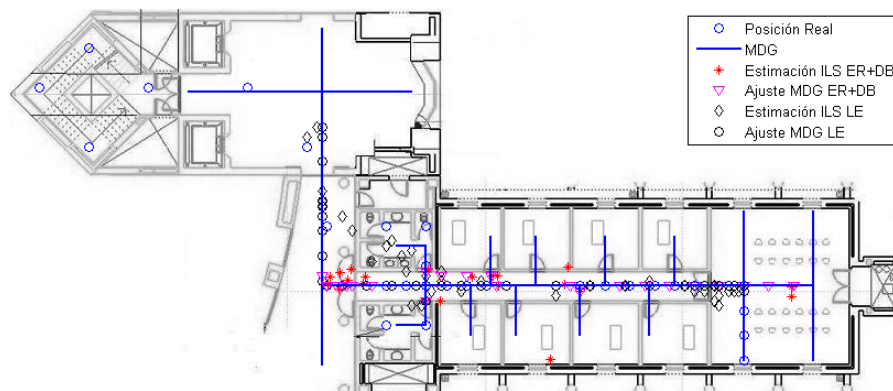


Figura 6.29: Resultados prueba experimental 3, 3ª planta

reduce el error medio en un 8 %.

Seguidamente se muestran los resultados proporcionados por el algoritmo de posicionamiento diseñado denominado Multilateración con Ejes Radicales con una Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB) incluyendo también la mejora propuesta denominada MDG. Como se puede observar en la tabla 6.3, se obtiene un error medio de 14 m para algoritmo diseñado frente a 12 m aplicando el ajuste a grafos de descripción métrica con el modelo de movimiento del móvil (MDG), por lo tanto en esta prueba el error medio se reduce en más de un 14 %.

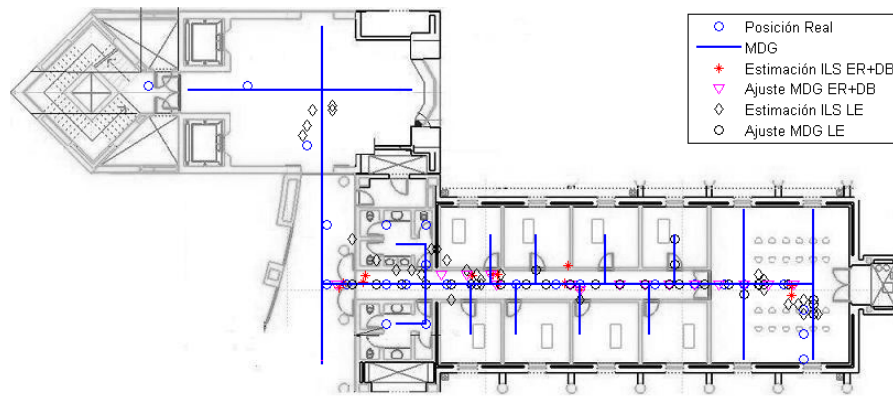


Figura 6.30: Resultados prueba experimental 3, 2ª planta

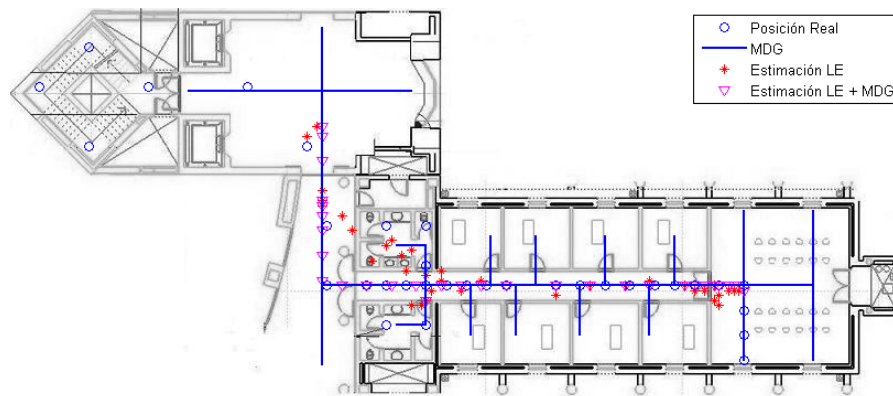


Figura 6.31: Resultados prueba experimental 3, LE vs LE+MDG 3ª planta

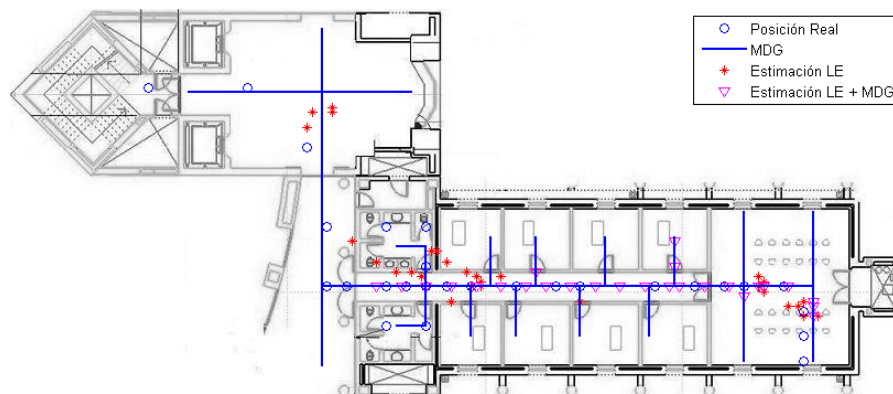


Figura 6.32: Resultados prueba experimental 3, LE vs LE+MDG 2ª planta

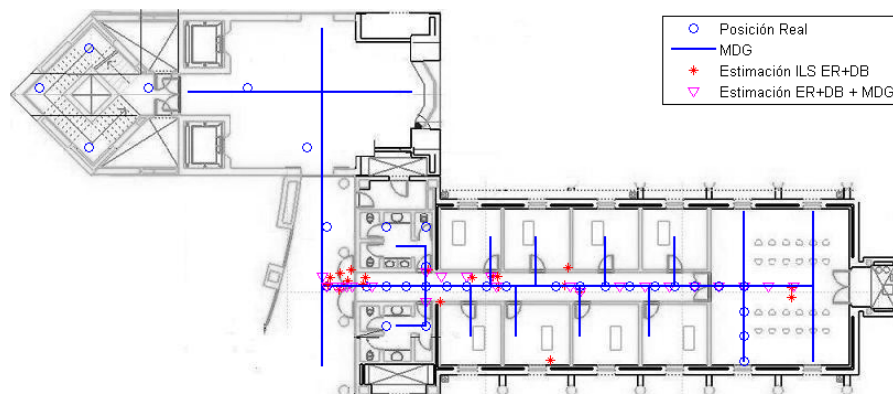


Figura 6.33: Resultados prueba experimental 3, 3^a planta, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG

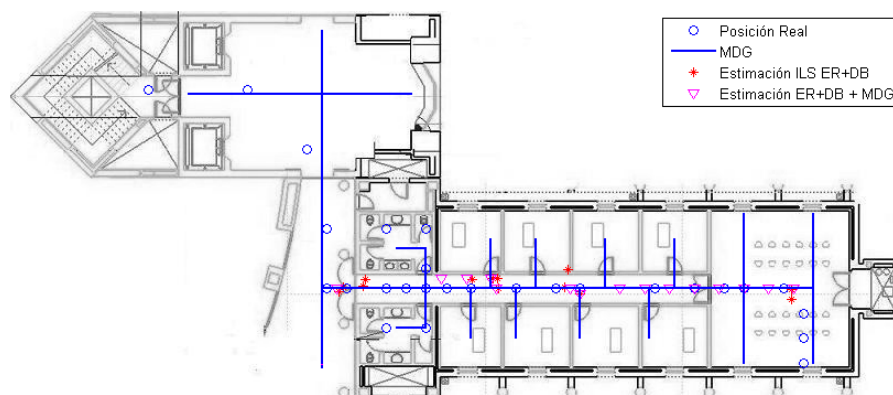


Figura 6.34: Resultados prueba experimental 3, 2^a planta, Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con y sin filtro MDG

Para terminar esta prueba experimental se comparan las diferencias entre el algoritmo utilizado por el fabricante Texas Instruments, *Location Engine*, y el algoritmo completo diseñado en este Trabajo, *Multilateración de Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado y ajuste a Grafos de Descripción Métrica (ER-DB+MDG)*. Según los resultados de la tabla 6.3, se obtiene un error medio de 8 m para *Location Engine* y aplicando el algoritmo completo propuesto se obtiene un error medio de 12 m , es decir, se aumenta el error medio en un 40% .

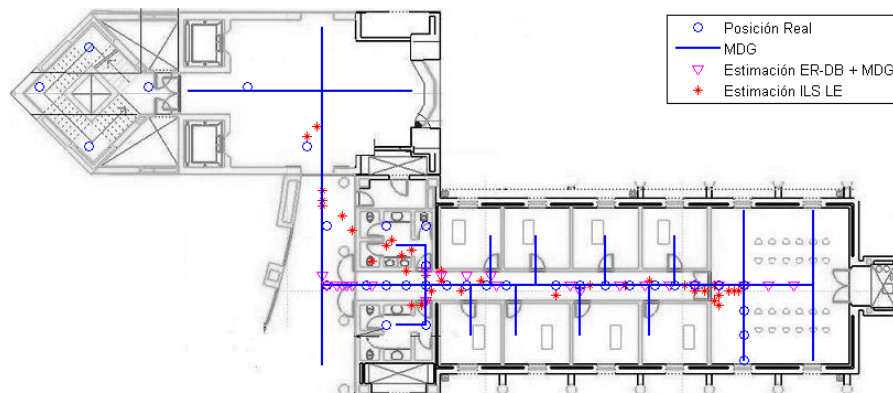


Figura 6.35: Resultados prueba experimental 3, 3ª planta, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG

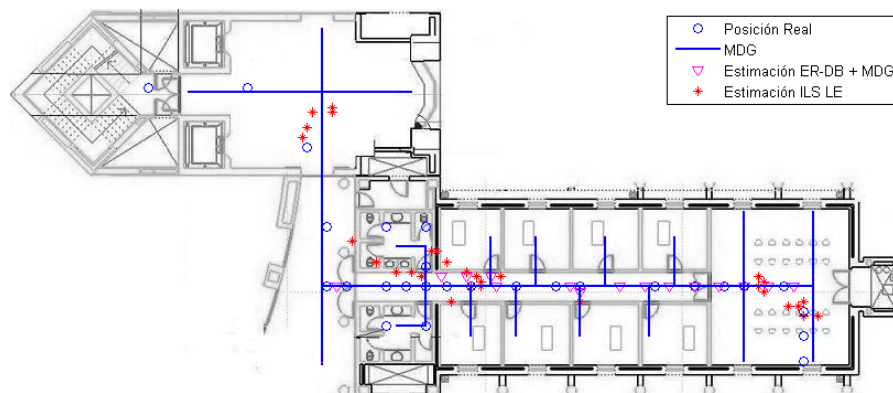


Figura 6.36: Resultados prueba experimental 3, 2ª planta, Location Engine y Multilateración con Ejes Radicales con Evaluación de Disparidad de Balizado con filtro MDG

En esta tercera prueba experimental el análisis es muy diferente a las demás pruebas, en esta prueba experimental lo que se comprueba es el sistema de posicionamiento en 2D5. Se puede decir que el sistema funciona correctamente en 2.5 dimensiones en situaciones con una densidad de balizas adecuada, también indicar que aunque la densidad de balizas sea baja o muy baja el sistema sigue funcionando, y en el momento que se encuentra otra vez en una situación de densidad de balizas adecuada proporciona resultados similares a las pruebas anteriores, realizadas en una única planta.

6.2.4. Prueba Experimental 4: simulador de red RF ZigBee

En esta cuarta prueba experimental, se realiza un recorrido por parte del móvil saliendo del laboratorio O31, recorriendo el pasillo O31 e introduciéndose en los baños, por último, regresará al laboratorio O31 por el mismo camino como se muestra en la figura 6.37, es decir, el mismo que en la prueba experimental 2 que tiene una complejidad media. Pero la principal diferencia es que este recorrido se realizará en el simulador de red RF ZigBee, se obtendrán los datos de los niveles de potencia RSSI y las coordenadas de la balizas y posteriormente se aplicarán los algoritmos de localización para la estimación de la posición del móvil, como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura 6.38.

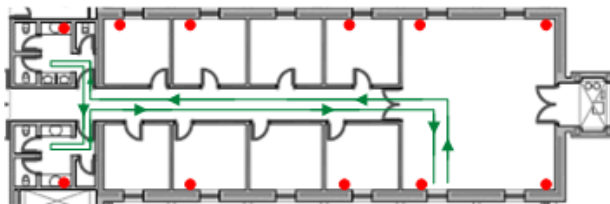


Figura 6.37: Recorrido prueba experimental 4

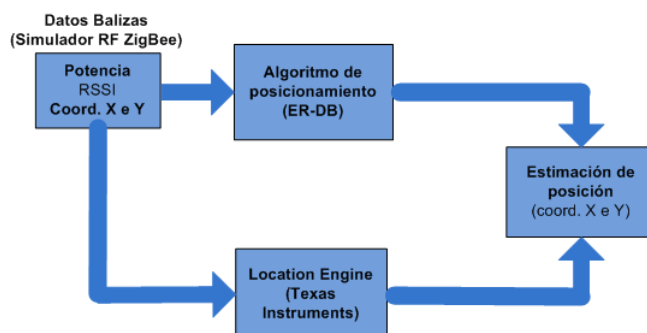


Figura 6.38: Diagrama de bloques de la prueba experimental 4

Mediante esta prueba experimental 4 se pueden apreciar las ventajas que proporciona el simulador de red RF ZigBee. Se puede observar fácilmente que densidad de balizas es necesaria para un correcto funcionamiento de la red RF ZigBee que se desea implementar en función del entorno (distribución de los despachos, paredes, muros, etc.). Primeramente se va a probar a realizar una correcta localización con una densidad baja de balizas, figura 6.39. Si con una densidad baja de balizas se consiguen unos buenos resultados en la estimación de la posición del móvil se ahorrarán importantes costes en cuanto al despliegue de la red RF ZigBee se refiere.

	Location Engine	ER + DB
Error medio	3.5 m	4.6 m

Tabla 6.4: Información de Error medio en la prueba experimental 4 (densidad de balizas baja)

Como se puede observar en la tabla 6.4 y en los errores al aplicar los algoritmos de localización en la figura 6.40, los errores que se comenten con esta densidad de balizas son elevados. En el caso de *Location Engine* con algunos errores próximos a 7 m y en el caso de *Multilateración con Ejes radicales y Evaluación de Disparidad de balizado* algunos errores llegan a los 12 m. Es

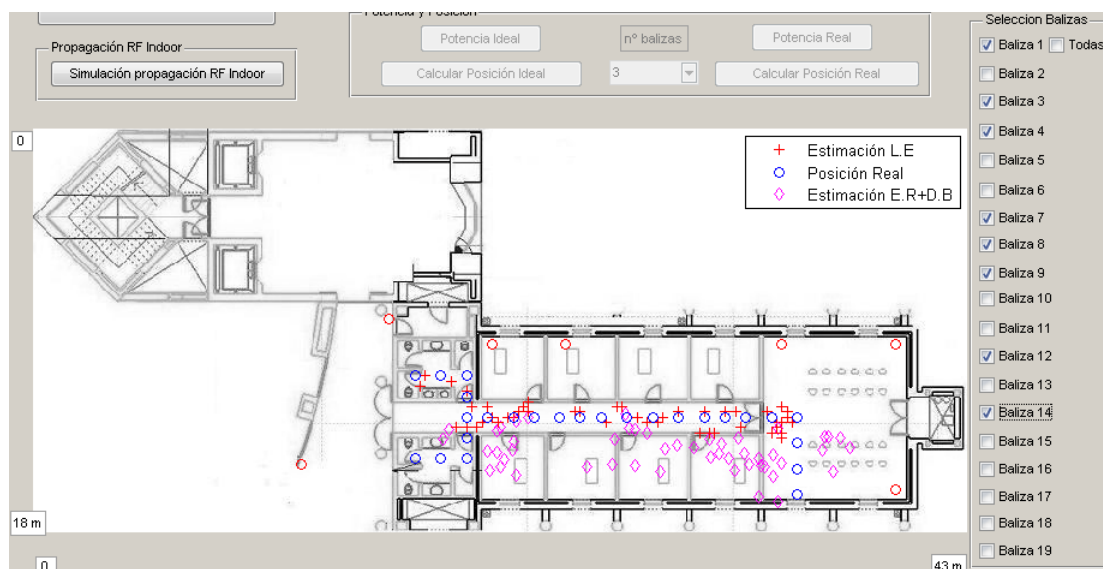


Figura 6.39: Imagen del simulador RF ZigBee con una densidad de balizas baja

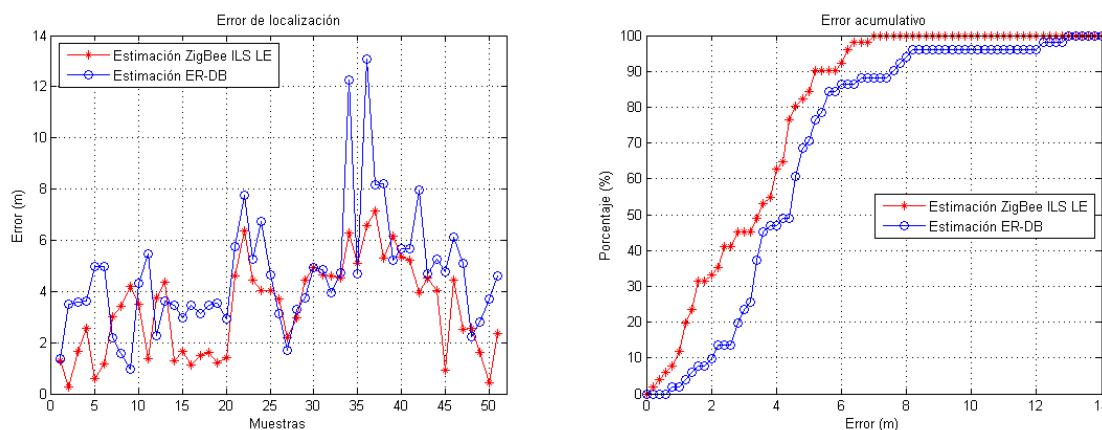


Figura 6.40: Errores entre LE y ER-DB con una densidad de balizas baja

decir, con una densidad baja de balizas en el entorno seleccionado la estimación de la posición del móvil sería muy imprecisa.

Debido a que no se consigue una buena estimación de la posición del móvil con una densidad baja de balizas. Se va a realizar el mismo paseo pero con una densidad alta de balizas como se puede observar en la figura 6.41 correspondiente al interfaz de usuario del simulador de red RF ZigBee. Como se aprecia en dicha figura y en la tabla 6.5, los datos obtenidos del simulador, a los cuales se les aplican los algoritmos de localización explicados en el capítulo anterior mejoran considerablemente con una densidad de balizas alta.

	Location Engine	ER + DB
Error medio	2.3 m	3 m

Tabla 6.5: Información de Error medio en la prueba experimental 4 (densidad de balizas alta)

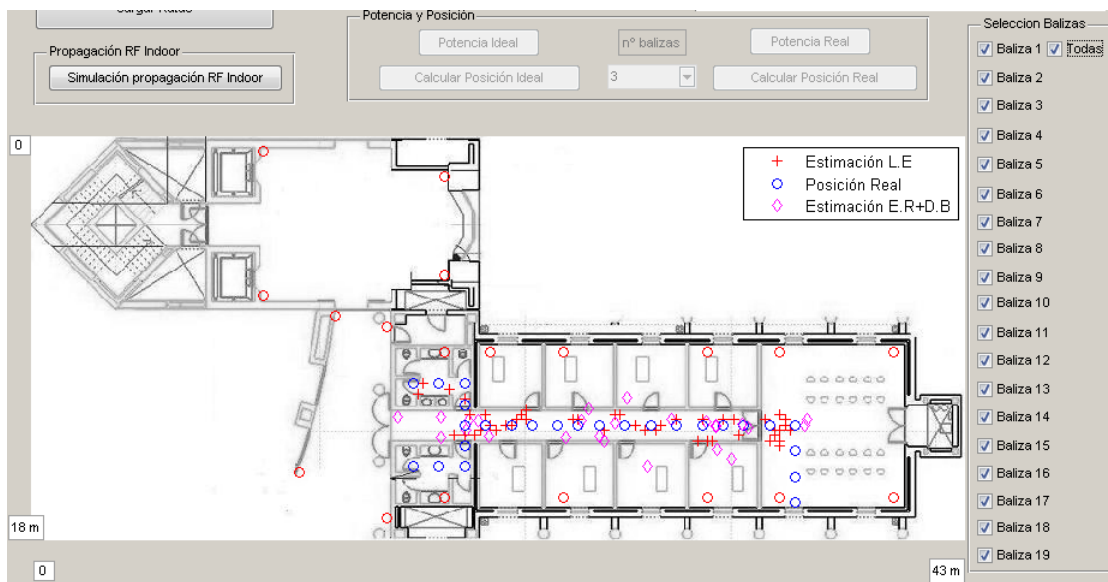


Figura 6.41: Imagen del simulador RF ZigBee con una densidad de balizas alta

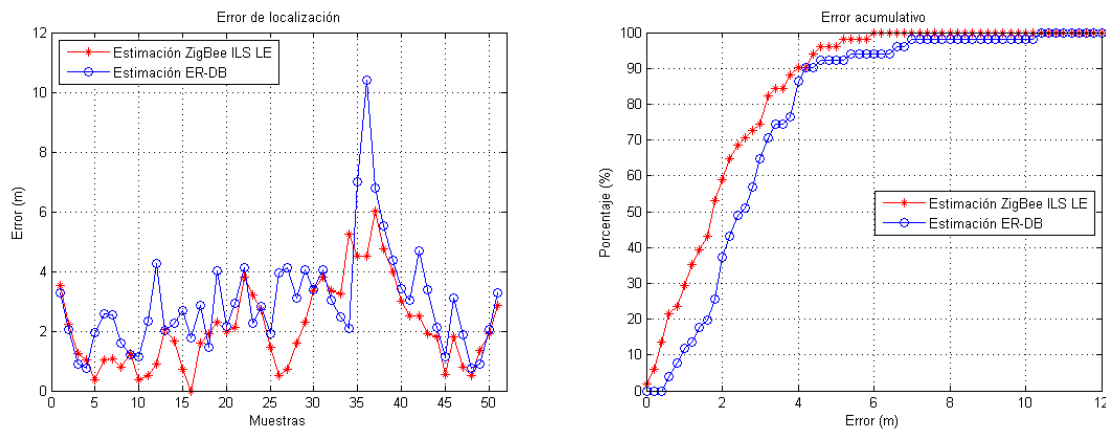


Figura 6.42: Errores entre LE y ER-DB con una densidad de balizas alta

Como conclusión a esta prueba experimental 4, comentar que en las zonas en las cuales la densidad de balizas es baja, los algoritmos de localización no actúan correctamente como ya se pudo observar en la prueba experimental 4 en donde la red RF física tiene una densidad de balizas baja. Por el contrario, si la densidad de balizas es alta, se consigue un error medio entre la posición real y la estimada del móvil mucho menor.

6.3. Discusión Crítica

En este capítulo de pruebas experimentales se ha comprobado el funcionamiento del sistema de localización en interiores (ILS) propuesto. Dicho sistema se ha diseñado e implementado como se ha indicado en capítulos anteriores, primeramente realizando un montaje físico de toda la red RF ZigBee y segundo desarrollando los algoritmos de localización adecuados para el correcto posicionamiento del móvil en función de la información obtenida de la red, en el interior extenso seleccionado.

Las pruebas experimentales realizadas cubren todos los recorridos posibles que podría realizar el móvil en el interior extenso seleccionado, partiendo de una primera prueba que discurre por espacios cerrados, y seguidamente por otras pruebas en las cuales se complica el recorrido. En la segunda prueba el móvil se desplaza por zonas abiertas o amplias del entorno. Como se ha podido comprobar en los resultados obtenidos en cada una de las pruebas experimentales, el algoritmo de localización denominado *Location Engine* proporciona un error medio entre la posición estimada y la posición real de 3.8 metros en el mejor de los casos y de 4.4 metros en el peor (con densidad de balizas adecuada), por lo que tiene un error medio de unos 4.1 metros en todas las pruebas realizadas. Se ha comprobado también que siempre que se aplica el ajuste a grafos de descripción métrica (MDG) la estimación de posición mejora considerablemente.

A la hora de verificar el algoritmo de localización propuesto en este Trabajo Fin de Grado, *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado*, se va a particularizar para dos zonas, en las zonas de pasillos y despachos se obtiene un error medio entre 3.8 y 4.3 metros, por lo que se obtiene un error similar al algoritmo *Location Engine*. Destacar que en las zonas amplias o abiertas del entorno, el error medio en la estimación de la posición es mucho mayor con respecto a *Location Engine*.

Antes de terminar este capítulo comentar las diferencias en los resultados obtenidos entre el algoritmo utilizado por el fabricante Texas Instruments, denominado *Location Engine (LE)*, y el algoritmo propuesto en este Trabajo Fin de Grado completo, es decir, *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado (ER-DB)* más un ajuste a grafos de descripción métrica del edificio (MDG). Comparando los resultados de la tabla 6.6 se puede observar que el algoritmo propuesto obtiene un error medio menor que *Location Engine* excepto en las zonas por espacios abiertos. Por último, indicar que siempre que se ha aplicado el MDG mejoran las estimaciones de posición.

	LE	LE + MDG	ER-DB	ER-DB + MDG
Prueba Experimental 1	3.8 m	3.5 m	3.8 m	3.75 m
Prueba Experimental 2	3.9 m	3.2 m	9.5 m	5.5 m
Prueba Experimental 3 (d.alta)	4.4 m	4.1 m	4.3 m	4.1 m
Prueba Experimental 3 (d.baja)	8 m	7.9 m	14 m	12 m

Tabla 6.6: Comparativa del error medio en las pruebas experimentales

También se han verificado los algoritmos utilizados en un sistema de 2.5 dimensiones comprobando que si la densidad de balizas era adecuada los resultados son similares a las pruebas en una única planta, reseñar que aunque la densidad de balizas sea baja o muy baja el sistema sigue en funcionamiento.

Por último, indicar que en la última prueba experimental (prueba experimental 4) se ha comprobado el funcionamiento del Simulador de red RF ZigBee, este permite conocer las características que debe tener una red RF ZigBee para una correcta estimación de la posición del móvil mediante el uso de los algoritmos descritos.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado el diseño e implementación de un sistema de localización en entornos extensos mediante tecnología RF ZigBee. Las aportaciones propuestas en este trabajo se enuncian a continuación.

Modelado y simulación del sistema de localización en interiores

Se ha realizado un simulador mediante el modelado de un sistema de localización en interiores, dicho simulador permite cargar un mapa, establecer sus dimensiones, fijar y controlar la activación y desactivación de las balizas y comprobar la precisión en las estimaciones de posición del móvil en el entorno creado. Por tanto, se ha modelado el entorno, el canal de propagación RF, los obstáculos como paredes y muros, etc., todo ello realizado con la herramienta Matlab.

Como conclusión decir que este simulador del sistema de localización en interiores permite simular el entorno en el cual se quiere establecer una red de localización física, permitiendo conocer previamente las características (número de balizas necesarias, distribución, etc.) que necesita dicha red para un correcto funcionamiento, es decir, para estimar la posición del móvil con una buena precisión. Por lo que es una herramienta muy útil para determinar las características que debe tener una red de localización RF ZigBee que se desee construir en un entorno extenso en el interior de un edificio.

Red de Localización

Se ha realizado el montaje físico de una red de localización en un interior extenso como es la tercera planta del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá en el Edificio Politécnico, cubriendo un área de 300 m^2 . Dicha red está formada por un nodo coordinador y diecinueve balizas o nodos de referencia que proporcionan una buena densidad de balizado para la estimación de la posición del móvil. Esta red permite comprobar los algoritmos de localización desarrollados en este Trabajo Fin de Grado y así obtener datos reales de estimación de la posición del móvil. Como se ha podido comprobar en el capítulo de pruebas experimentales se observa como los datos y resultados aportados por la red de localización permiten una correcta estimación de la posición del móvil. También indicar que se ha verificado la posibilidad de usar el sistema en 2.5 dimensiones (varias plantas de un edificio) con el montaje extra de varias balizas de referencia móviles en la segunda planta del Departamento de Electrónica de la Universidad

de Alcalá en el Edificio Politécnico, por tanto $300\text{ m}^2 + 300\text{ m}^2$.

Algoritmos de Localización

Para estimar la posición del móvil a partir del nivel de potencia RSSI es necesario aplicar algoritmos de localización que permitan estimar correctamente la posición del móvil a localizar. Para ello, se han hecho uso de dos algoritmos de posicionamiento en este trabajo: *Location Engine* del fabricante Texas Instruments y *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado*. Además, se ha propuesto un proceso de mejora de la estimación en ambos algoritmos denominado *Ajuste a Grafos de Descripción Métrica del entorno*, MDG.

- *Location Engine*: Mediante los ajustes necesarios (calibración, gestión de mensajes, etc.) se han conseguido estimaciones de posición, con un error medio de 4.1 metros en el entorno descrito en este Trabajo Fin de Grado, tanto en zonas de pasillos y despachos como en zonas abiertas o amplias. También concluir que si se añade el ajuste MDG a este algoritmo la estimación de posición mejora visiblemente como se ha mostrado en el capítulo de pruebas experimentales.
- *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado*: Este algoritmo propuesto es la suma del algoritmo de posicionamiento *Multilateración con Ejes Radicales* más un proceso de reestructuración de balizas denominado *Evaluación de Disparidad de Balizado* que permite modificar el número de balizas con las cuales se estima la posición del móvil. Con esta propuesta conjunta de algoritmo de localización se consigue un error medio de 4.1 metros, es decir, se consiguen resultados similares a los proporcionados por el algoritmo comercial utilizado por el fabricante Texas Instruments en espacios de pasillos y despachos. Sin embargo, como se ha podido comprobar en el capítulo anterior de pruebas experimentales, en las zonas amplias o abiertas con menor densidad de balizas, los resultados son ligeramente peores que con el algoritmo *Location Engine*. Como en el caso anterior, al añadir el ajuste MDG se consiguen mejores resultados en la estimación de posición del móvil.
- *Ajuste a Grafos de Descripción Métrica del entorno*: Esta propuesta no es un algoritmo de localización, sino una mejora para los algoritmos de localización anteriores. En ambos casos se ha comprobado que introduciendo este ajuste a grafos de descripción métrica del entorno, se consigue mejorar la estimación de la posición del móvil a localizar. En el caso del algoritmo *Location Engine* se consiguen mejoras de hasta el 20 % en la estimación. Pero en el caso del algoritmo de localización *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de Balizado* la mejora aumenta hasta el 40 %, como se ha comprobado en los resultados proporcionados por las pruebas experimentales en el capítulo anterior.

Trabajos Futuros

Por último, para terminar este capítulo indicar las posibles líneas futuras derivables de este Trabajo Fin de Grado, algunas de ellas ya iniciadas.

- En primer lugar, aunque los resultados obtenidos en la mayoría de las pruebas son los esperados, sería necesario mejorar los algoritmos de localización para espacios abiertos en los

cuales la densidad de balizas es pequeña. Dicha mejora se podría producir modificando los algoritmos descritos o aumentando el número de balizas para conseguir menos zonas con líneas de visión no directa entre el móvil a localizar y las balizas. También otra propuesta es mejorar el *Ajuste a Grafos de Descripción Métrica del entorno (MDG)* modificando su comportamiento. En espacios estrechos como pasillos y despachos el recorrido del móvil es limitado y el MDG se puede ajustar correctamente, en cambio en zonas amplias el móvil puede recorrer múltiples trayectorias lo que dificulta su actuación.

- Los Algoritmos de Localización propuestos en este Trabajo Fin de Grado se han comprobado siempre capturando datos previamente y luego realizando el procesamiento correspondiente de una forma *off-line*. Por tanto, sería necesario establecer algún sistema que permitiera procesar los datos recibidos y estimar la posición del móvil en tiempo real. En este Trabajo Fin de Grado se ha iniciado una propuesta que consiste en utilizar el dispositivo BlueBoard LPC1768H que permitiría capturar los datos procedentes de la red de localización física, mediante mensajes ya creados en este trabajo, y procesar los algoritmos de localización para estimar la posición del móvil *on-line*.
- Para finalizar, indicar que todo el proceso realizado se ha llevado a cabo para establecer la posición del móvil en 2D (coordenada X e Y) y 2D5 (coordenada X, Y y planta). Por tanto, una mejora posible sería realizar un montaje físico similar en más de dos plantas del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá en el Edificio Politécnico, para disponer de una red física de localización con múltiples plantas. Por otra parte, permitiría obtener información adicional y así poder estimar la posición del móvil en 2D5 en edificios de múltiples plantas. Debido a que simplemente se indicaría la planta en la que se situaría el móvil, se podría hacer de una forma similar a la que se ha utilizado en este Trabajo Fin de Grado, determinar la planta de las balizas detectadas de mayor potencia.

Parte IV

Pliego de condiciones

Requisitos de Hardware

Los requisitos hardware de los que se ha dispuesto para la realización de este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Ordenador Compaq de sobremesa:
 - Procesador Intel Pentium D2 Dual Core.
 - 2 GByte de memoria RAM.
 - 500 GByte de disco duro.
 - Puerto serie y USB.
- Kit de desarrollo CC2431DK
 - Un nodo coordinador.
 - 25 balizas o nodos de referencia (CC2430).
 - Un nodo móvil (CC2431).
- Cable convertidor USB-RS-232 para la comunicación entre el nodo coordinador y el PC.
- Placas impresas para nodos de referencia o balizas.

Requisitos de Software

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se ha dispuesto de los siguientes programas o herramientas software:

- IAR Embedded Workbench.
- Z-Stack 1.4.3-1.2.0, Texas Instruments.
- Matlab versión 7.6.
- Microsoft Office 2010.
- Windows XP Profesional SP3.

Parte V

Manual de Usuario

Apéndice A

Simulador de red RF ZigBee

En este capítulo denominado Manual de Usuario se va a proceder a explicar como el usuario debe interactuar con los dos sistemas desarrollados en este Trabajo: el simulador de red RF ZigBee desarrollado con la herramienta Matlab; y la red de localización y la grabación del firmware en los módulos ZigBee utilizados del fabricante Texas Instruments.

Como se ha indicado en el párrafo anterior, en este primer apartado se va a indicar como el usuario debe interactuar con el simulador de red RF ZigBee, figura A.1, desarrollado con la herramienta Matlab.

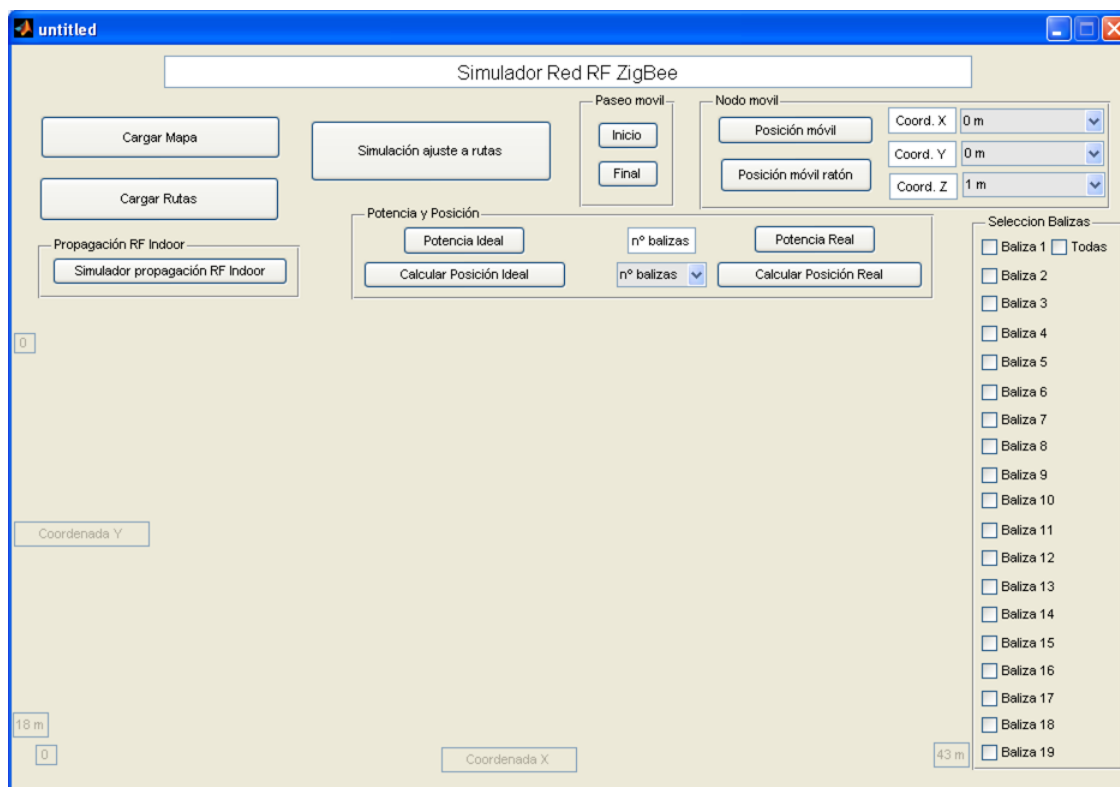


Figura A.1: Interfaz de usuario del simulador de red RF ZigBee

- *Cargar Mapa*: selección del mapa a utilizar.

- *Cargar Rutas*: creación del grafo de descripción métrica del mapa, Metric Description Graph (MDG), situación de pasillos, paso a través de puertas, etc., es decir, paso habitual del móvil.
- *Selección de balizas*: permite seleccionar las balizas activas.
- *Posición móvil*: permite posicionar el móvil en las coordanas (X,Y,Z) deseadas.
- *Posición móvil ratón*: igual que el botón anterior pero realizando el posicionamiento directamente pinchando con el ratón.
- *Potencia Ideal*: calcula la potencia ideal recibida por el móvil de cada una de las balizas activas.
- *Calcular Posición Ideal*: calcula la posición ideal a partir de la potencia ideal recibida y de las coordenadas de las balizas.
- *Potencia Real*: calcula la potencia real recibida por el móvil de cada una de las balizas activas.
- *Calcular Posición Real*: calcula la posición real a partir de la potencia real recibida y de las coordenadas de las balizas.
- *nº balizas*: indica el número de balizas que participan en el calculo de la posición
- *Paseo móvil*: permite realizar la simulación de varias posiciones del móvil de forma continua.
- *Simulación ajuste a rutas*: ejemplo de ajuste de posiciones estimadas del móvil al grafo de rutas o MDG.
- *Simulador propagación RF Indoor*: ejemplo de propagación de RF en interiores en función del mapa y las balizas activas.

A.1. Cargar mapa

El primer paso a realizar es cargar un mapa del entorno en la cual se quiere simular el comportamiento de una red RF ZigBee, para ello se deberá presionar el boton denominado *Cargar Mapa*. Una vez cargado el mapa aparecerá el mapa cargado en el interfaz como se muestra en la figura A.2.

Indicar que cuando una cierta acción sea necesaria antes que otra, esto se limita no activando el botón en la interfaz, es decir, ciertos botones permanecen inactivados hasta que no es activado otro botón.

A.2. Cargar rutas

Una vez que se tiene el mapa del entorno, se puede obtener el grafo de rutas o MDG del mapa presionando el botón *Cargar Rutas*. Actualmente como se ha indicado en este Trabajo la generación del MDG se hace de forma manual para cada mapa, pero se esta trabajando en la

generación del MDG de una forma automática [Gua11]. El comportamiento del MDG se puede observar también en la figura A.2.

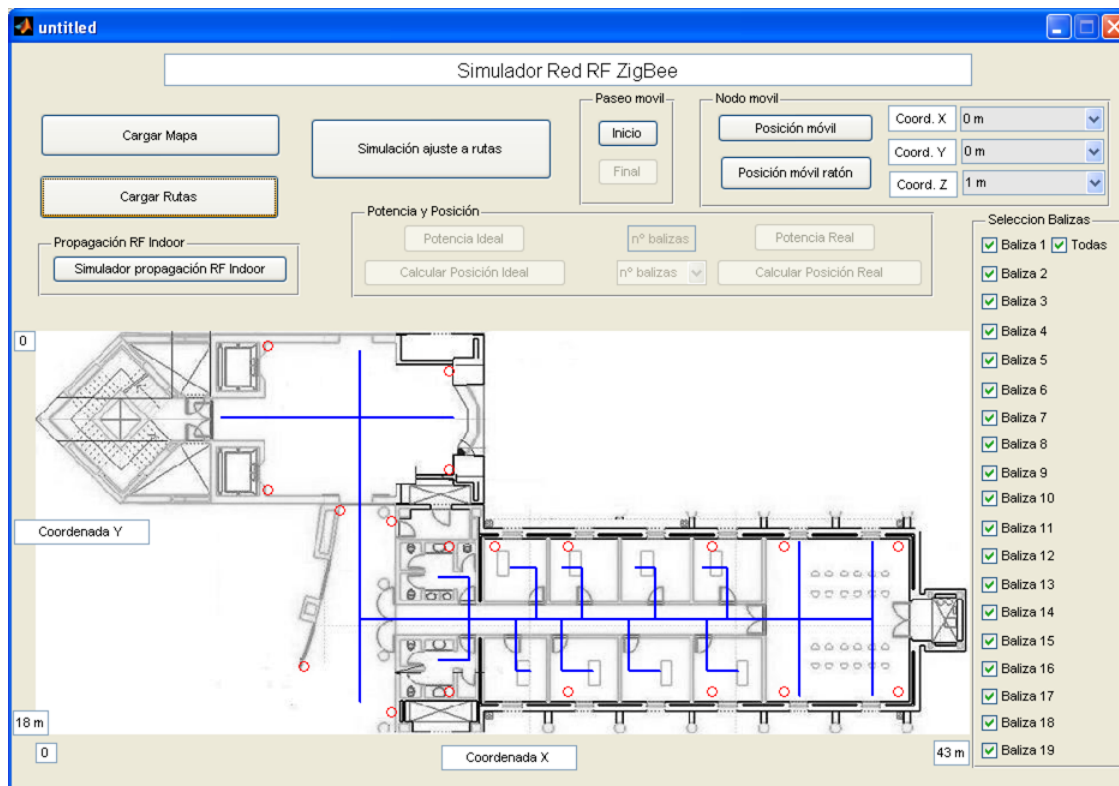


Figura A.2: Interfaz de usuario - con mapa, grafo de rutas y balizas seleccionadas

A.3. Selección de balizas

El tercer paso es activar un número de balizas necesario para realizar la estimación de la posición. En el caso de 2D es necesario un mínimo de 3 balizas y en 3D un mínimo de 4 balizas. Para la selección de las balizas se hace uso de los botones proporcionados en la parte derecha de la interfaz, figura A.2. Dicha selección de balizas se puede hacer de forma individual o si se desea se pueden activar todas las balizas a la vez, figura A.3.

A.4. Posición del móvil

Como cuarto se establece la posición del móvil, en este caso hay dos opciones: la primera pulsando directamente sobre el mapa; y una segunda indicando las coordenadas exactas del móvil como se indica en la figura A.4.

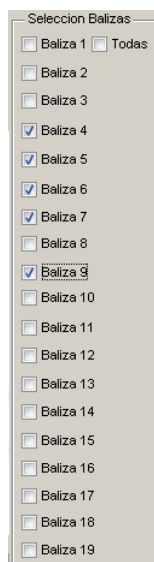


Figura A.3: Selección de las balizas activas

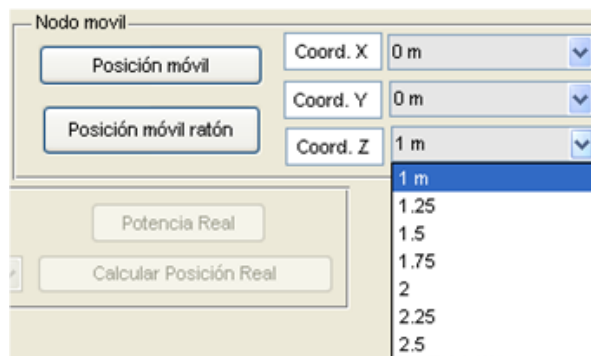


Figura A.4: Selección de la posición del móvil en la interfaz

A.5. Potencia

Una vez establecidos los aspectos anteriores se podrá proceder al calculo de la potencia que recibirá el móvil por parte de cada una de las balizas activas. En este trabajo se han diferenciado dos tipos de potencia a calculas: potencia ideal que solo tiene en cuenta atenuaciones por distancia; y potencia real en la cual se tiene en cuenta la distancia, el canal y las paredes o muros. Para seleccionar una u otra se presiona el botón deseado, figura A.5.

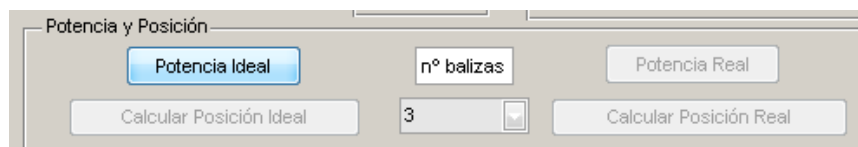


Figura A.5: Potencia recibida de cada una de las balizas en el móvil

A.6. Estimación de la posición

Una vez establecida la potencia que recibe el móvil de cada baliza activa se puede activar el calculo de la estimación de posición del móvil, figura A.5. Pero antes es necesario establecer cuantas balizas se van a utilizar para dicha estimación como se indico en el capítulo de *Estimación de la posición del móvil. Algoritmos de Localización*, ya que para esta estimación se hace uso del algoritmo *Multilateración con Ejes Radicales y Evaluación de Disparidad de balizado*.

A.7. Paseo móvil

Esta opción, figura A.6 de la interfaz del simulador de red RF ZigBee permite establecer un paseo continuo directamente, es decir, el usuario activa el botón *Inicio* y sobre el mapa va *pinchando* en las posiciones deseadas para su paseo virtual. Al mismo tiempo el simulador ira calculando la estimación de la posición que se irá imprimiendo en pantalla. Para finalizar el paseo simplemente es necesario presionar el botón de *Final*.

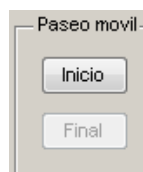


Figura A.6: Paseo virtual del móvil en el entorno

A.8. Simulaciones extra

En este apartado se explican dos opciones de *simulación especial* que tiene el simulador de red RF ZigBee, figura ??: Simulación de propagación RF indoor y simulación de ajuste a rutas.

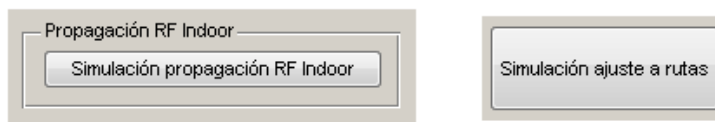


Figura A.7: Simulación de propagación RF en interiores y simulacion de actuación del MDG

Simulación de propagación RF en interiores

Esta simulación permite conocer la atenuación que tendrían cada una de las balizas activas en función del entorno (distancia, paredes, etc.). Indicar que actualmente esta opción se debe realizar de una forma manual en función del mapa seleccionado, es decir, en función del mapa se deberán establecer las coordenadas de las paredes y muros. Aunque como se ha indicado anteriormente se esta trabajando en una forma automática de generación. Por tanto, al activar esta opción se cargaría el mapa y solo sería necesario indicar las balizas activas pinchando simplemente en la pantalla, y se podría observar la atenuación de cada una de ellas.

Simulación de ajuste a rutas

En este caso, esta opción permite cargar datos procedentes de una red RF ZigBee real (nivel de potencia recibido en el móvil de cada una de las balizas) y mediante los algoritmos de posicionamiento explicados en este Trabajo estimar la posición y luego comprobar su ajuste a rutas, es decir, al grafo de descripción métrica MDG.

Apéndice B

Puesta en marcha de la red de localización

En este segundo apartado del manual de usuario se van a indicar los pasos que debe realizar el usuario para la puesta en marcha de la red de localización desarrollada en este Trabajo Fin de Grado.

Primeramente se deberá conectar el elemento que gestiona la red de localización y que como se ha dicho en apartados anteriores, es el Coordinador, como se muestra en la figura B.1.



Figura B.1: Coordinador de la red de localización

Una vez conectado el coordinador se procederá a realizar la conexión de las balizas de referencia que se han instalado en la tercera planta del Departamento de Electrónica del Edificio Politécnico Superior de la Universidad de Alcalá. La instalación de las balizas de referencia se ha realizado utilizando el falso techo para llevar los cables de la alimentación y las balizas se

han situado en el techo de la tercera planta. Para la conexión de las balizas se ha utilizado un simple enchufe como se ve en la figura B.2.

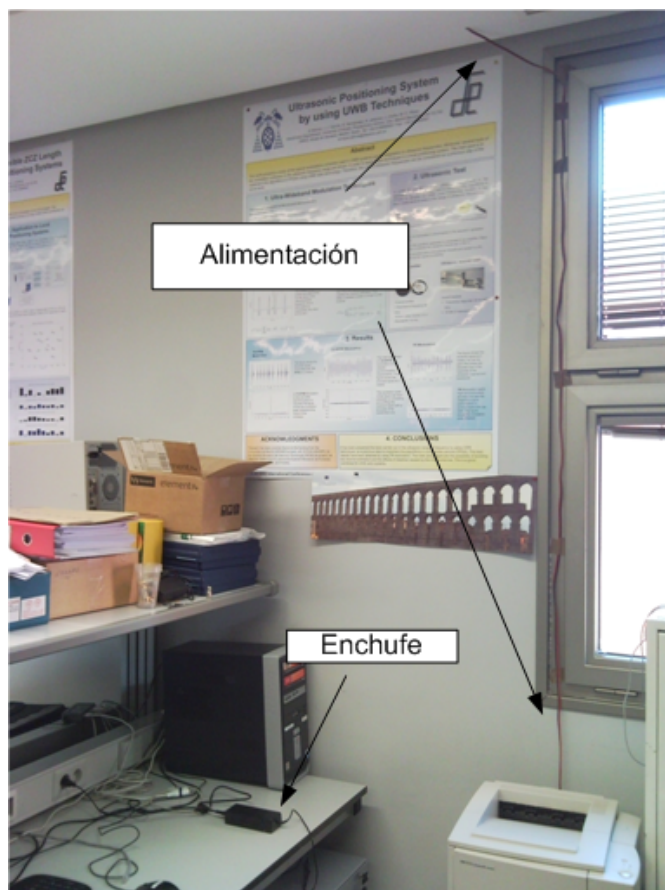


Figura B.2: Conexión de las balizas de referencia de la red de localización

En este momento, ya se tienen conectados todos los elementos que forman la red de localización, coordinador y balizas de referencia. Es el momento de comunicarse con el coordinador mediante el puerto serie. Para ello se debe abrir el HyperTerminal (Inicio ->Programas ->Comunicación ->Hyperterminal). En el Hyperterminal se podrán escribir los mensajes para que la red de localización funcione, por ejemplo se pueden cargar las coordenadas de las balizas de referencia o el mensaje de inicio de posicionamiento del nodo móvil.

Las comandos se introducen en el HyperTerminal, que hará que las ordenes lleguen al coordinador y de este al resto de dispositivos de la red de localización. Se muestra un ejemplo correspondiente a un mensaje de inicio de localización del nodo móvil en la figura B.3.

Una vez que se envía el mensaje deseado el coordinador interpreta el mensaje y se pone en funcionamiento. Por ejemplo, indicando mediante mensajes las coordenadas de la posición del nodo móvil o la potencia de las balizas de mayor nivel, que se visualizarán por el HyperTerminal como se muestra en la siguiente figura B.4.

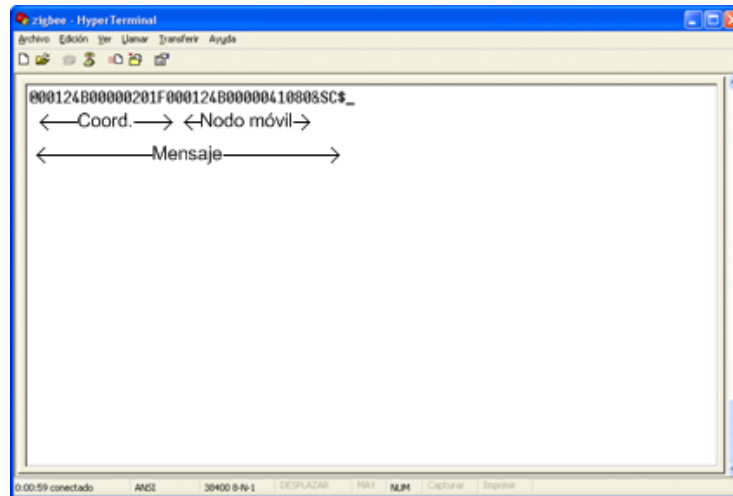
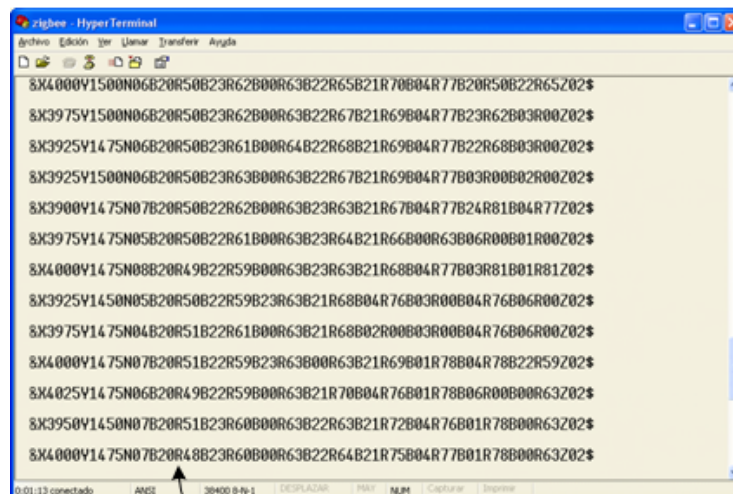


Figura B.3: Introducción de mensajes por el Hyperterminal



Potencia y posición de las balizas de referencia

Figura B.4: Impresión de información por el Hyperterminal

Apéndice C

Grabación del firmware en los módulos ZigBee

En este tercer apartado del manual de usuario se va a indicar como el usuario debe realizar la grabación del firmware en los módulos ZigBee utilizados del fabricante Texas Instruments.

C.1. Compilador IAR EmBedded Workbench

IAR Embedded Workbench es un programa diseñado para realizar la programación, compilación y depuración de las aplicaciones sobre el dispositivo CC243x. Este Trabajo se inició con el TFC previo de Jesús García [Gar10].

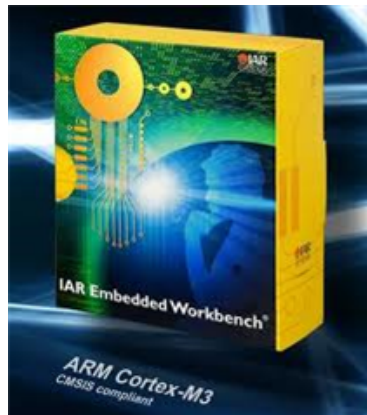


Figura C.1: Compilador IAR Embedded Workbench

En este paquete IAR Embedded Workbench viene todo lo necesario para su correcta instalación y para el funcionamiento y desarrollo del mismo. Para la creación de un nuevo proyecto, el Kit contiene un manual de usuario donde encontrar toda la información necesaria. Este software proporciona una manera sencilla y útil para compilar cualquier tipo de aplicación y depurarla en tiempo real.

Z-Stack o pila ZigBee es una plataforma de desarrollo que permite realizar aplicaciones Zig-

Bee. Este paquete distribuido por Texas Instruments incluye todas las librerías necesarias para empezar cualquier tipo de proyecto, ya sea de domótica como de cualquier otro campo de aplicación.

La instalación es sencilla puesto que solo hay que instalar un archivo que el usuario puede descargarse de la propia página web del fabricante *www.ti.com*. Este conjunto de programas es el encargado de configurar todas las características funcionales de los módulos CC243x. Después de la compilación se realiza el volcado del programa sobre el microcontrolador y si se desea, también se puede hacer una depuración en tiempo real.

Además gracias a esta serie de programas, la creación de una aplicación se convierte en una tarea sencilla, ya que de forma automática se encarga de reconocer la dirección y la zona de memoria de cada dispositivo.

La pila ZigBee permite acceder a todos los periféricos situados en la placa SmartRF04EB que se encuentren conectados con el módulo de evaluación.

Este paquete dispone de todo lo necesario para crear una red ZigBee, enlazar dispositivos, configurar todos los dispositivos, coordinador, router o dispositivo final, y por supuesto para enviar y recibir datos de distintas maneras.

La relación existente entre Z-Stack e IAR System es importante ya que ambos proporcionan la herramienta idónea para trabajar con los dispositivos de Texas Instruments. IAR proporciona el entorno para crear la aplicación, mientras que la pila ZigBee proporciona los programas y librerías necesarias para realizarlo de una forma rápida e intuitiva.

Por ejemplo, gracias al paquete de programas se puede acceder al display LCD de la tarjeta SmartRF04EB con una simple instrucción. Ya que los programas incluidos en la Z-Stack contienen todas las instrucciones necesarias para controlar dicho dispositivo.

C.2. Códigos fuente de los módulos CC243x

Para poner en marcha la red de nodos ZigBee es necesario contar con el código fuente correspondiente al coordinador de red y el del resto de nodos que componen la red. El fabricante Texas Instruments proporciona dichos códigos para que se pueda crear la red fácilmente pero también permite modificar los códigos en función de los deseos del programador.

El proyecto del código fuente para todos los dispositivos, coordinador, nodo de referencia y nodo móvil, se encuentra incluido en el soporte informático en la carpeta *NexusFW*, que cuenta con los siguientes directorios:

- El directorio *CC2430DB* incluye los archivos con las opciones de compilación del proyecto, las librerías correspondientes a los drivers del microcontrolador, la pila del protocolos ZigBee y el sistema operativo.

- El directorio *source* incluye el código fuente de nuestra aplicación en concreto.

C.3. Programación de los módulos CC243x

C.3.1. Pasos a seguir para la programación de un módulo CC243x

El proceso de programación de los distintos nodos es que se describe a continuación:

- Arrancar el entorno de desarrollo IAR Embedded Workbench.
- Abrir el proyecto que se desea cargar desde el menu File/Open.
- Ir al directorio donde este el código fuente, abrir la carpeta CC2430DB, seleccionar el archivo *Nexus_FW* y abrirlo.
- En la ventana Workspace seleccionar el dispositivo que se quiere programar *CoordinadorEB* si lo que se desea programar es el coordinador de la red y *RouterEB* si lo que se desea es programar un nodo fijo o móvil.

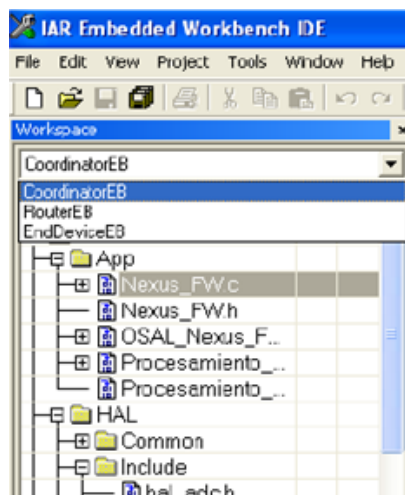


Figura C.2: Selección del tipo de dispositivo en el entorno IAR Embedded Workbench

- Recompilar todo el proyecto en el menú *Project/Rebuild All*. Es necesario si se cambia de tipo de dispositivo, ya sea router o coordinador, recompilar nuevamente todo el proyecto para el nuevo dispositivo.
- Conectar el cable USB entre el PC y el programador (Tarjeta de Evaluación SmartRF04EB) y encenderlo. Si el módulo que se quiere programar esta sobre una placa SocBB, se debe realizar la conexión con un cable plano como se puede ver en la figura C.3.
- Programar el dispositivo en menú *Project/Debug*.
- Una vez finalizado el proceso de programación, seleccionar en el menú *Debug/Stop Debugging*, quedando el dispositivo programado y listo para funcionar.



Figura C.3: Programación de un módulo CC243x sobre SocBB

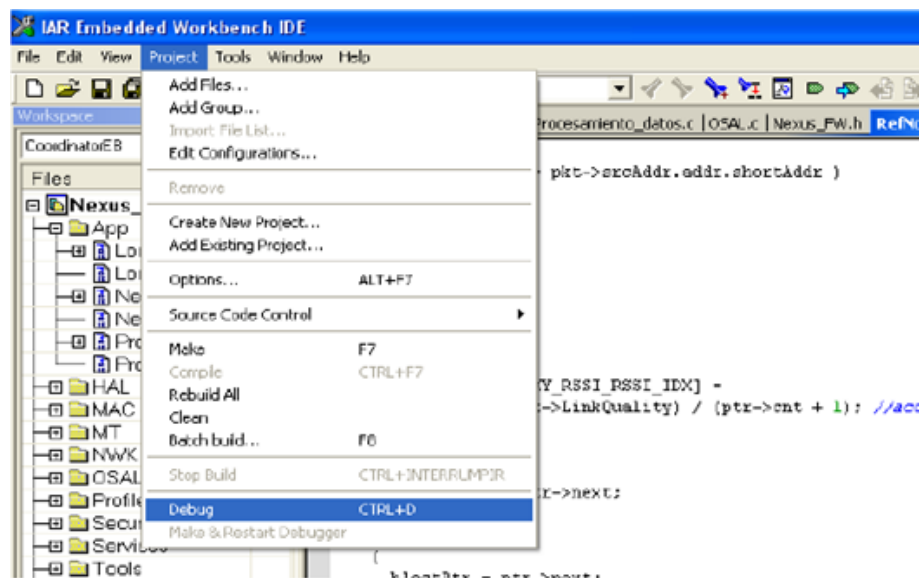


Figura C.4: Inicio de programación

C.3.2. Carga del Firmware de un coordinador para el Sistema de Localización

Las librerías del coordinador están configuradas para trabajar con la tarjeta de evaluación SmartRF04EB, en el caso de no utilizar esta tarjeta hay que cambiar la configuración de las librerías del coordinador. Para ello arrancar el entorno de desarrollo IAR Embedded Workbench y abrir el proyecto ILS, en la ventana de trabajo Workspace seleccionar *CoordinadorEB* y en el menú *Project* → *Options* → *CategoryC/C++Compiler* → *Preprocesor* → *Definedsymbols*, eliminar las siguientes líneas: *PERMISO_LCD=TRUE* y *LCD_SUPPORTED=TRUE*.

Por último hay que recompilar el proyecto completo y seguir los pasos indicados en la programación de los módulos CC243x ZigBee.

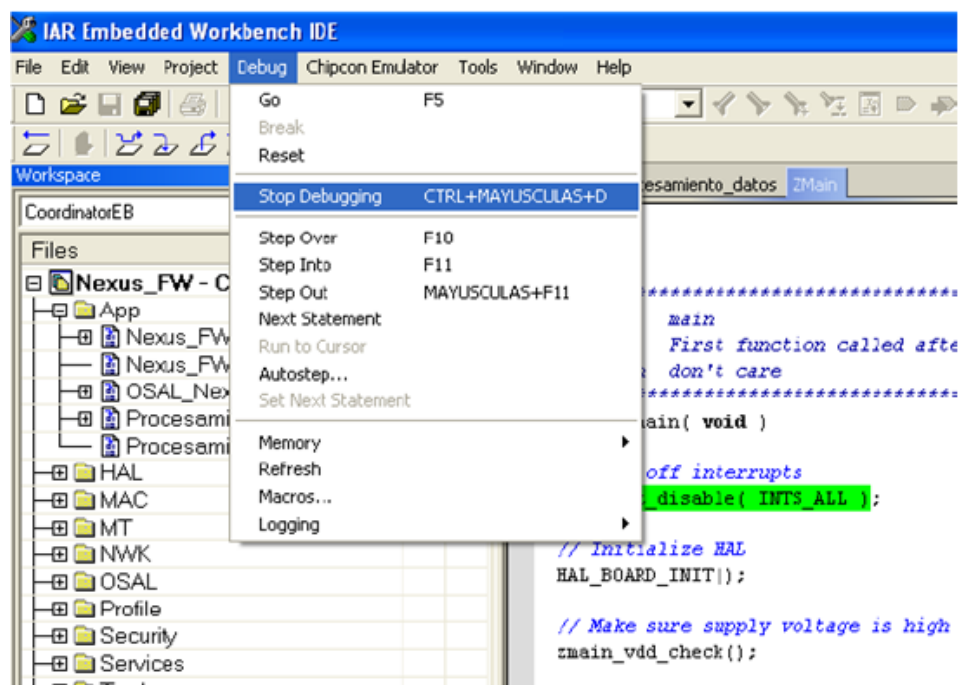


Figura C.5: Finalización de programación

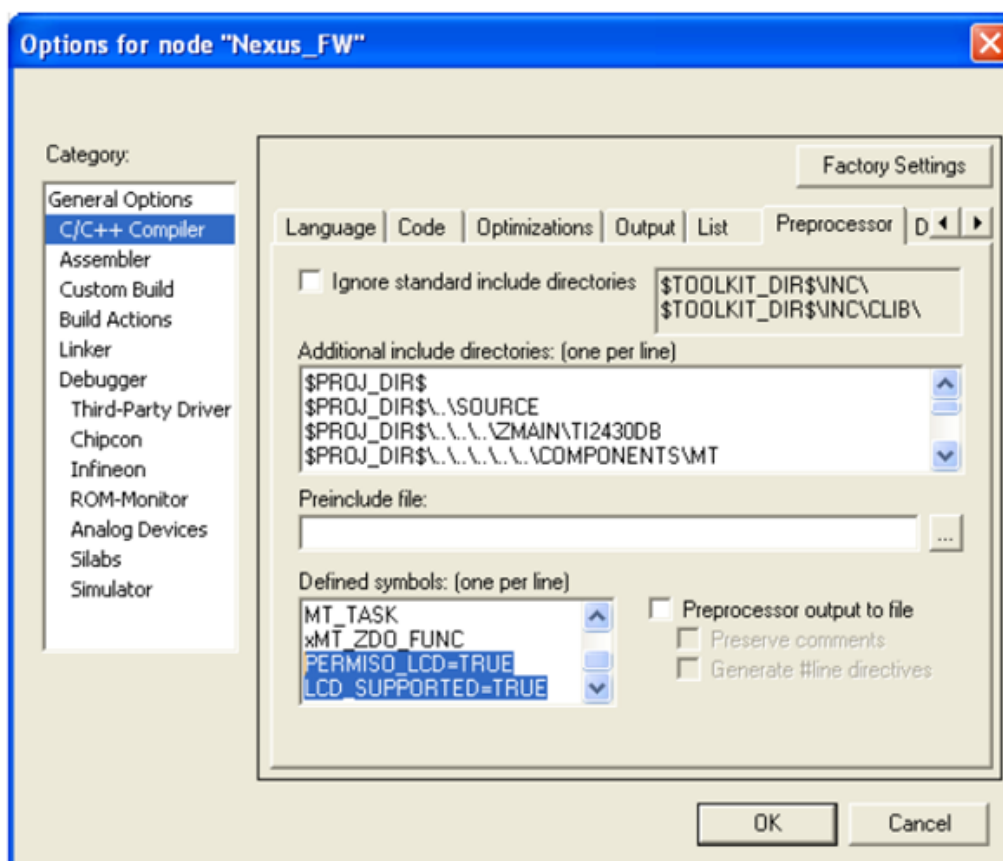


Figura C.6: Indicaciones del pre-procesador según el Hardware utilizado

C.3.3. Carga del Firmware de un nodo de referencia para el Sistema de Localización

Abrir el proyecto ILS, con el entorno de desarrollo IAR Embedded Workbench, siguiendo los pasos indicados en anteriores apartados. En la ventana de trabajo workspace seleccionar *RouterEB* y en el archivo *LocationProfile.h* quitar el comentario de la línea *#define LOCATION_REFNODE* y comentar la línea *#define LOCATION_BLINDNODE*, de esta manera al compilar el proyecto se hará con los ficheros que precisa la aplicación para implementar un nodo de referencia.

Una vez hecho este paso se siguen los pasos ya explicados en la programación.

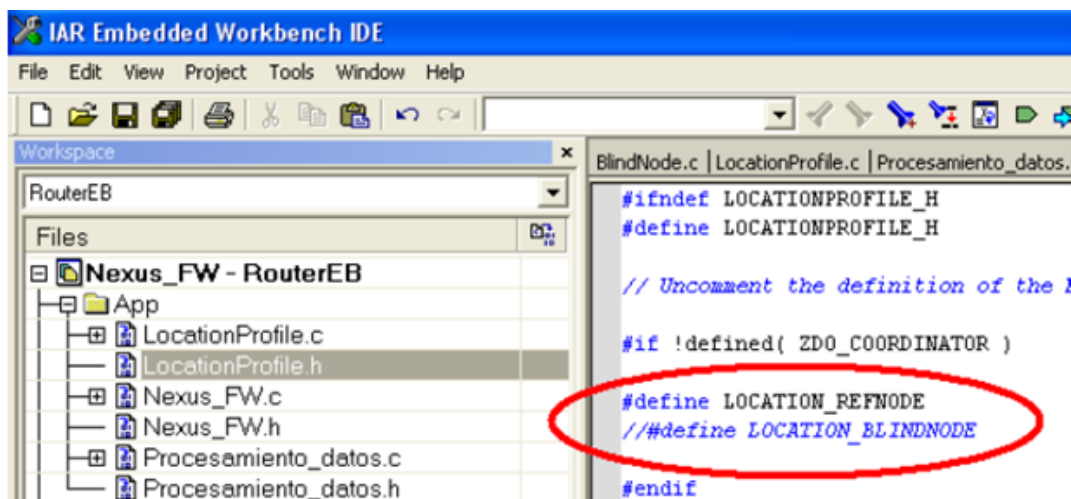


Figura C.7: Elección de nodo de referencia o nodo móvil en la programación

C.3.4. Carga del Firmware de un nodo móvil para el Sistema de Localización

Para este caso el proceso es exactamente el mismo que para el apartado anterior con la salvedad de que en el archivo *LocationProfile.h*, la línea *#define LOCATION_BLINDNODE* debe estar sin comentar y la línea *#define LOCATION_REFNODE* comentada.

Parte VI

Bibliografía

Bibliografía

- [ABC+03] G. Anastasi, R. Bandelloni, M. Conti, F. Delmastro, E. Gregori y G. Mainetto, *Experimenting an Indoor Bluetooth-Based Positioning Service*, Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 480-484, May. 2003.
- [ACH+01] M. Addlesee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward y A. Hopper, *Implementing a Sentient Computing System*, IEEE Computer, vol. 34, no. 8, pp. 50-56, Ago. 2001.
- [ATK+94] A. Abdi, C. Tepedelenlioglu, M. Kaveh y G. Giannakis, *On the estimation of the K parameter of the rice fading distribution* IEEE Communications letters, Vol. 5, No. 3, Marzo 2001, pp. 92-94.
- [Bah09] A. Bahillo Martínez. *Sistema de localización inalámbrica en entornos de interior mediante el uso del retardo temporal y el nivel de potencia de las señales de radiofrecuencia*. Tesis Doctoral, Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones, Universidad de Valladolid, Diciembre 2009.
- [BMP+09] A. Bahillo, S. Mazuelas, J. Prieto, R.M. Lorenzo, P. Fernández y E.J. Abril, *Indoor Location Based on IEEE 802.11 Round-Trip Time Measurements with Two- Step NLOS Mitigation*, Progress In Electromagnetics Research B, vol. 15, pp. 285- 306, Sep. 2009.
- [BP00] P. Bahl y V. Padmanabhan, *RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System*, Proceedings of IEEE Computer and Communications Societies, vol. 2, pp. 775-784, Mar. 2000.
- [BPM+09] A. Bahillo, J. Prieto, S. Mazuelas, R.M. Lorenzo, J. Blas y P. Fernández, *IEEE 802.11 Distance Estimation Based on RTS/CTS Two-Frame Exchange Mechanism*, Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Abr. 2009.
- [CBI07] M. Ciurana, F. Barcelo-Arroyo y F. Izquierdo, *A Ranging System with IEEE 802.11 Data Frames*, Proceedings of Radio Wireless Symposium, pp. 133-136, Ene. 2007.
- [CCM+08] C. Cayuelas, B. Coll, J. Muñoz, P. Corral y E. Ávila, *Antenas Impresas para Redes de Localización Zigbee*, Actas del XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, 2008.
- [CFR+09] E. Cassano, F. Florio, F. De Rango y S. Marano, *ZigBee Based Location Estimation in Home Networking Environments*, Proceedings of IEEE Wireless Telecommunication Symposium, Abr. 2009.
- [Che99] P.-C. Chen, *A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation*, Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference, vol. 1, pp. 316-320, Sep. 1999.

- [CKK+07] H. Cho, M. Kang, J. Kim y H. Kim, *Real Time Locating System for Wireless Networks using IEEE 802.15.4 radio*, IEICE Transactions, vol. 90, no. 10, pp. 578- 580, Jun. 2007.
- [CL02] V.C. Chen y H. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2002.
- [CPG+08] P. Corral, E. Peña, R. Garcia, V. Almenar y A. de C. Lima, *Distance Estimation System Based on ZigBee*, Proceedings of IEEE International Conference on Computational Science and Engineering Workshops, pp. 405-411, Jul. 2008.
- [DCF+09] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti y M.Z. Win, *Ranging with Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments*, Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 404-426, Feb. 2009.
- [Die12] D. Daniel de Diego, *Diseño, desarrollo y despliegue de un sistema de posicionamiento local basado en ultrasonidos*, Trabajo Fin de Carrera, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2012.
- [Dij04] E.O. Dijk, *Indoor Ultrasonic Position Estimation Using a Single Base Station*, Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Eindhoven, Eindhoven, Holanda, Sep. 2004. Director: C.H. van Berkel y J.W.M. Bergmans.
- [DNW10] J.Drake, D.Najewicz, W.Watts, *Energy Efficiency Comparisons of Wireless Communication Technology Options for Smart Grid Enabled Devices*, General Electric Company, GE Appliances & Lighting, Dec. 2010.
- [Egl57] J.J. Egli, *Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain*, Proceedings of the IRE (IEEE), vol. 45 no. 10, pp. 1383-1391. Oct. 1957.
- [FDM+06] C. Falsi, D. Dardari, L. Mucchi y M.Z. Win, *Time of Arrival Estimation for UWB Localizers in Realistic Environments*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, vol. 2006, pp. 1-13, 2006.
- [Fer07] Oscar Fernández Fernández, *Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN*, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, May. 2007.
- [FHP98] E. Foxlin, M. Harrington y G. Pfeifer. *Constellation: A Wide-Range Wireless Motion-Tracking System for Augmented Reality and Virtual Set Applications*. Proceedings of ACM SIGGRAPH, pp. 371-378, 1998.
- [FKZ+03] S. Feldmann, K. Kyamakya, A. Zapater y Z. Lue, *An Indoor Bluetooth Based Positioning System: Concept, Implementation and Experimental Evaluation*, Proceedings of the International Conference on Wireless Networks, pp. 109- 113, Jun. 2003.
- [FLL08] Shih-Hau Fang, Tsung-Nan Lin y Kun-Chou Lee, *A Novel Algorithm for Multipath Fingerprinting in Indoor WLAN Environments*, IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 7, no. 9, pp. 3579-3588, Sep. 2008.
- [Gar10] J. García Andrés, *Sistema de Localización con balizas RF ZigBee*, Proyecto Final de Carrera, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. 2010.
- [Gas02] M.S. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, O'Reilly Media, Inc., Abr. 2002.

- [Geintra] GEINTRA, *Grupo de Ingeniería Electrónica Aplicada a Espacios Inteligentes y Transporte*, Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, www.geintra-uah.org.
- [GG05] F. Gustafsson y F. Gunnarson, *Mobile Positioning Using Wireless Networks*, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 41-53, Jul. 2005.
- [GJB06] J.C. García, A.R. Jiménez y J. Baliñas, *Proyecto Ariadna*, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá y Grupo LOPSI (IAI-CSIC), 2006.
- [GN09] A. Ghahri y M.A. Nekoui, *Localization of Mobile Robots with RFID Technology and Expectation Maximization Algorithm*, International Journal of Systems Signal Control and Engineering Application, vol. 2, no. 1, pp. 8-14, 2009.
- [GSC79] G. Giralt, R. Sobek y R. Chatila, *A Multi-Level Planning and Navigation System for a Mobile Robot; A First Approach to Hilare*, Proceedings of International Joint Conference of Artificial Intelligence, vol. 1, pp. 335-337, 1979.
- [GTG+05] S. Gezici, Zhi Tian, G.B. Giannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor y Z. Sahinoglu, *Localization via Ultra-WideBand Radios: a Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks*, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, Jul. 2005.
- [Gua11] D. Gualda Gómez, *Servicio de Navegación para Interiores Extensos*, Trabajo Fin de Máster, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2011.
- [Has93] H. Hashemi, *The indoor radio propagation channel*, Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 7, July 1993, pp. 943-968.
- [Hat80] M. Hata, *Empirical Formulae for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*, IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 29, no. 3, pp. 317-325, Ago. 1980.
- [HDE04] A. Hub, J. Diepstraten y T. Ertl, *Design and Development of an Indoor Navigation and Object Identification System for the Blind*, Proceedings of ACM SIGACCESS Accessibility and Computing, pp. 147-152, Oct. 2004.
- [HSK04] M. Hazas, J. Scott, and J. Krumm. *Location-aware computing comes of age*. *Computer*, 37(2):95-97, 2004.
- [HWB00] J. Hightower, R. Want, y G. Borriello, *SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength*, Technical report, Universidad de Washington, Dpto. of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, Feb. 2000.
- [IEEE07] *IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std 802.11-2007 (Revisión del IEEE Std 802.11- 1999), Ene. 2007.
- [JDW08] D. Jourdan, D. Dardari y M.Z. Win, *Position Error Bound for UWB Localization in Dense Cluttered Environments*, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 44, no. 2, pp. 613-628, Jun. 2008.
- [Jon05] G. Jones, *Echolocation*, Current Biology, vol.14, no. 3, pp. 484-488, 2005.
- [KH01] P. McKerrow y N. Harper, *Plant acoustic density profile model of CTFM ultrasonic sensing*, IEEE Sensors Journal, vol. 1, no. 4, pp. 245-255, Dic. 2001.

- [KKJ+04] P. Krishnan, A.S. Krishnakumar, W. Ju, C. Mallows y S. Gamu, *A System for LEASE: Location Estimation Assisted by Stationary Emitters for Indoor RF Wireless Networks*, Proceedings of IEEE Computer and Communications Societies, vol. 2, pp. 1001-1011, Mar. 2004.
- [KLF+09] T. King, H. Lemelson, A. Farber y W. E®elsberg, *BluePos: Positioning with Bluetooth*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing , Ago. 2009.
- [Kuc07] R. Kuc, *Biomimetic sonar and neuromorphic processing eliminate reverberation artifacts*, IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 3, pp. 361-369, Mar. 2007.
- [LCC+05] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, I. Smith, J. Scott, T. Sohn, J. Howard, J. Hughes, F. Potter, J. Tabert, P. Powledge, G. Borriello y B. Schilit, *Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild*, Proceedings of the International Conference on Pervasive Computing, pp. 116-133, May. 2005.
- [LCS+97] Y. Lee, J. Choi, I. Song y S. Lee, *Distributed Source Modeling and Direction- Of-Arrival Estimation Techniques*, IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 45, pp. 960-969, Abr. 1997.
- [LF01] M. Lott, I. Forkel, *A Multi-Wall-and-Floor Model for Indoor Radio Propagation*, Vehicular Technology Conference, 2001 Spring. IEEE VTS 53rd , Volume: 1 , Pages:464 - 468 vol.1, 6-9 May 2001.
- [Lor01] S. Loredó, *Modelo de canal específico del entorno para el análisis y simulación de sistemas vía radio en interiores*, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2001.
- [LS02] J.Y. Lee y R.A. Scholtz, *Ranging in a Dense Multipath Environment Using an UWB Radio Link*, IEEE Journal on Selected Areas in Communicatgions, vol. 20, no. 9, pp. 1677-1683, Dic. 2002.
- [MBL+09] S. Mazuelas, A. Bahillo, R.M. Lorenzo, P. Fernández, F.A. Lago, E. García, J. Blas y E.J. Abril, *Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks*, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Special issue on Advanced Signal Processing for GNSS and Robust Navigation, vol. 3, no. 5, pp. 821-831, Oct. 2009.
- [MBP+09] S. Mazuelas, A. Bahillo, J. Prieto, R.M. Lorenzo, J. Blas, P. Fernández y F.A. Lago, *Assessment of Optimum Geometric Distribution of Anchors in a Wireless Location System*, Proceedings of the IEEE Wireless Telecommunication Symposium, Abr. 2009.
- [MLB+08] T. Manodham, L. Loyola y T. Miki, *A Novel Wireless Positioning System for Seamless Internet Connectivity Based on the WLAN Infrastructure*, International Journal on Wireless Personal Communications, vol. 44, pp. 295-309, Feb. 2008.
- [MLM08] T. Manodham, L. Loyola y T. Miki, *A Novel Wireless Positioning System for Seamless Internet Connectivity Based on the WLAN Infrastructure*, International Journal on Wireless Personal Communications, vol. 44, pp. 295-309, Feb. 2008.
- [MT05] A. Madhavapeddy y A. Tse, *A Study of Bluetooth Propagation Using Accurate Indoor Location Mapping*, Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin/Heidelberg, vol. 3660, pp. 105-122, Ago. 2005.

- [NDA04] C. Nerguizian, C. Despins y S. Afees, *Indoor Geolocation with Received Signal Strength Fingerprinting Technique and Neural Networks*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3124, pp. 866-875, Jul. 2004.
- [NLL+03] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau y A.P. Patil, *LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID*, Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, pp. 407-415, Mar. 2003.
- [OHO+07] Y. Ota, T. Hori, T. Onishi, T. Wada, K. Mutsuura y H. Okada, *Localization of Passive RFID tags with Robot using Adaptive Likelihood Distribution Algorithm*, Proceedings of the Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, 2007, pp. 163-168, Dic. 2007.
- [Oku68] Y. Okumura et al., *Field Strength and Its Variability in VHF and UHF LandMobile Radio Service*, Review of the Electrical Communications Laboratories, vol. 16, pp. 825-873, 1968.
- [PAC93] H. Peremans, K. Audenaert y J. Van Campenhout, *A High Resolution Sensor Based on Tri-Aural Perception*, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, no. 1, pp. 36-48, Feb. 1993.
- [PLM02] K. Pahlavan, X. Li y J.P. Mäkelä, *Indoor Geolocation Science and Technology*, IEEE Communication Magazine, vol. 40, pp. 112-118, Feb. 2002.
- [PMB+01] N.B. Priyantha, A.K.L. Miu, H. Balakrishnan y S. Teller, *The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications*, Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 1-14, 2001.
- [Qi06] Y. Qi, *Analysis of Wireless Geolocation in a Non-Line-of-Sight Environment*, IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 5, no. 3, pp. 672-681, Mar. 2006.
- [Ric45] S.O. Rice, *Mathematical analysis of random noise*, The Bell System Technical Journal, Vol. 23, 1944, pp. 282-332 y Vol. 24, 1945, pp. 46-156.
- [RMT+02] T. Roos, P. Myllymäki, H. Tirri, P. Misikangas y J. Sievänen, *A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation*, International Journal on Wireless Information Networks, vol. 9, no. 3, pp. 155-164, Jul. 2002.
- [SBM+04] G.L. Stuber, J.R. Barry, S.W. McLaughlin, Ye Li, M.A. Ingram, T.G. Pratt, *Broadband MIMO-OFDM wireless communications*, Proceedings of the IEEE, Vol. 92, Issue 2, Febrero 2004, pp. 271- 294.
- [SFO79] J.A. Simmons, M.B. Fenton y M.J. O'Farrell, *Echolocation and Pursuit of Prey by Bats*, Science, vol. 203, pp. 16-21, 1979.
- [SGG08] Z. Sahinoglu, S. Gezici y I. Găuvenç, *Ultra-WideBand Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms and Protocols*, Cambridge University Press, 2008.
- [SK02] G.N. DeSouza y A.C. Kak, *Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 2, pp. 237- 267, Feb. 2002.
- [SK04] K. Siwiak y D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*, England: John Wiley and Sons, 2004.

- [SPF04] A. Stelzer, K. Pourvoyeur y A. Fischer, *Concept and application of LPM - a novel 3-D local position measurement system*, IEEE Tran. on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 12, pp. 2664-2669, Dic. 2004.
- [TC05] K. Thapa y S. Case, *An Indoor Positioning System Using Bluetooth Ad Hoc Networks*, Proceedings of the ISA Expo, 2003.
- [TI11] Texas Instruments. Low-Power RF System-on-Chip for ZigBee Applications, *Technical Documentation*, <http://www.ti.com>, Jun. 2011.
- [TK06] D. Taubenheim, S. Kyperountas, *Distributed Radiolocation Hardware Engine for IEEE 802.15.4 and ZigBee*, Feb. 2006.
- [VKP95] F. van der Wijk, A. Kegel, R. Prasad, *Assessment of a pico-cellular system using propagation measurements at 1.9 GHz for indoor wireless communications* IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 44, No. 1, February 1995, pp. 155-162.
- [WHFG92] Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcao, and Jonathan Gibbons. *The Active Badge location system*. ACM Trans. Inf. Syst., 10(1):91-102, 1992.
- [WJH97] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. *A new location technique for the active office*. IEEE Personal Communications, 4(5):42-47, 1997.
- [XC11] Yuan Xu, Xiyuan Chen, *Node Localization in Wireless Sensor Network Using Dynamic Distance Prediction Algorithm*, IEEE 2011.
- [Xio98] L. Xiong, *A selective model to suppress NLOS signals in angle-of-arrival (AOA) location estimation*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, vol. 1, pp. 461-465, Sep. 1998.
- [YOT+05] R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa y T. Kato, *TDOA Location System for IEEE 802.11b WLAN*, Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol. 4, pp. 2338-2343, Mar. 2005.
- [ZAK07] Y. Zhang, M.G. Amin y S. Kaushik, *Localization and Tracking of Passive RFID Tags Based on Direction Estimation*, International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2007, Oct. 2007.